

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

д.т.н., професор

_____ Костянтин ДЯДЮРА

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти
Освітньої програми «Агроінженерія»
За спеціальністю 208 «Агроінженерія»

ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН

Науковий керівник:

_____ к.т.н., доц. Сергій УМИНСЬКИЙ

Рецензент: д.т.н., проф. Василь ЛАРШИН

Виконав здобувач денної форми навчання

Петро КАНІН

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання
ідей і текстів інших авторів має посилання
на відповідне джерело.*

_____ **Петро КАНІН**

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра Агроінженерії

Рівень вищої освіти другий магістерський

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 Агроінженерія

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Петру КАНІНУ

(ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту):

« Технологія відновлення та зміцнення робочих поверхонь ґрунтообробних машин »,

науковий керівник кваліфікаційної роботи:

к.т.н., доцент Сергій УМИНСЬКИЙ

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету
№ 124 від «27» червня 2025 р.2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи : 15 грудня 2025 року3. Об'єкт дослідження: Технологія зміцнення та відновлення робочих органів ґрунтообробних машин4. Предмет дослідження: Технологічний процес ґрунтообробного напрямку робочих органів.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ: Конструкція, умови та причини втрачч працездатності при зношенні. Методи та матеріали відновлення та зміцнення при культивуванні. Створення зварювального поєднання та теплов. характеристики.5.2. Дослідницько-аналітичний розділ: Моделювання процесу зносу робочих поверхонь при культивуванні. Математична модель осідання каналів та каналів при ґрунтообробі.

5.3. Проектно-рекомендаційний розділ: Результати уясових випробувань при у загорюм'ялому наплав-ленні: Результати досліджень експериментальних умов. Розробка технології загорюм'ялого наплавлення.

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу:

Конструкція, умови роботи та призначення агрегатів працездатності при м'якому вібруванні. Способи відновлення та зміцнення родових сировин. Технології покращення методів нанесення покриттів.

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

Анали, що діють на застосування (сфери) у в'язанні металів. Методи проведення уясових випробувань у лабораторних та польових умовах.

6.3. До проектно-рекомендаційного розділу:

Методи нанесення покриттів на родових сировин. Технології загорюм'ялого наплавлення.

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи :

Умис експлуатації при м'якому вібруванні. Висновки про вплив адгезивних та інших факторів на процес з'єднання, що впливають на показуєтья на експериментальних роботах, а також на збільшенні опору та зносу машини.

8. Перелік публікацій за напрямом досліджень:

Технології відновлення та зміцнення родових сировин. Технології покращення методів нанесення покриттів. Тех V Міжнародної науково-технічної конференції. 2-3 жовтня 2025 р.

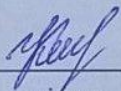
9. Дата видачі завдання: «28» червня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

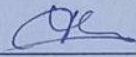
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	Травень 2025	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту (плану) кваліфікаційної роботи	Червень 2025	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку	Липень 2025	0,5	

	з підготовки кваліфікаційної роботи			
4.	Написання першого (теоретико-методичного) розділу кваліфікаційної роботи	Вересень 2025	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	Вересень 2025	1,0	
6.	Написання другого (дослідницько-аналітичного) розділу кваліфікаційної роботи	Жовтень 2025	2,0	
7.	Написання третього (проектно-розрахункового) розділу кваліфікаційної роботи	Листопад 2025	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	Листопад 2025	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи науковим керівником	Листопад 2025		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	Листопад 2025	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	Грудень 2025	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи на кафедру	16 грудня 2025		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність	Грудень 2025		
14.	Попередній захист на кафедрі	Грудень 2025		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи	Грудень 2025		
16.	Захист кваліфікаційної роботи	18-20 грудня 2025	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС «Магістр»


підпис Петро КАНІН

Науковий керівник


підпис Сергій УМИНСЬКИЙ

Гарант ОП


підпис Анатолій ЯКОВЕНКО

РЕФЕРАТ

Метою роботи є обґрунтування технології зміцнення та відновлення робочих органів ґрунтообробних машин газополум'яним наплавленням.

. Обґрунтовано математичну модель процесу зносу ґрунтообробних машин робочих органів та визначено характер зносу лап культиваторів.

Обґрунтовано модель технологічного процесу газополум'яного наплавлення ґрунтообробних робочих органів, виявлено залежності фізико-механічних та експлуатаційних властивостей наплавлених покриттів від складу порошкової суміші та режимів газополум'яного наплавлення.

Встановлено залежність фізико-механічних та експлуатаційних властивостей покриттів від складу порошкових матеріалів та режимів газополум'яного наплавлення. Запропоновано склад порошкового матеріалу для нанесення покриттів газополум'яної наплавки стійких до абразивного зношування.

Обґрунтовано технологічний процес нанесення зносостійких покриттів на робочі поверхні лап культиваторів.

Ключові слова: НАПЛАВЛЕННЯ, ЗНОС, ПОКРИТТЯ, ПОРОШОК, ТЕХНОЛОГІЯ, ТЕРТЯ.

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	2
РЕФЕРАТ.....	4
ВСТУП.....	7
1.ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ.....	8
1.1 Конструкція, умови роботи та причини втрати працездатності лапи культиватора	8
1.2. Методи та матеріали відновлення та зміцнення лап культиватора....	12
1.3. Утворення зварювального полум'я та теплові характеристики при газополум'яному наплавленні.....	17
2. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОПИС МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ.....	20
2.1. Моделювання процесу зносу робочих поверхонь лапи культиватора.	20
2.2. Фізична природа утворення покриття при газополум'яному наплавленні.....	29
2.3. Математична модель осідання наплавлених частинок при газополум'яному наплавленні.....	32
2.4. Методика проведення зносних випробувань у лабораторних та польових умовах.....	38
2.5. Методика нанесення порошкових сумішей технологією газополум'яного наплавлення.....	41
3. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОШУВАННЯ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ЛАПИ КУЛЬТИВАТОРА.....	42
3.1. Результати зносних випробувань лап у польових умовах.....	46

3.2. Результати досліджень якості наплавлених шарів.....	52
3.3. Розробка технології газополум'яного наплавлення.....	54
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	59
5. БІЗНЕС-ПЛАН НА РЕКОНСТРУКЦІЮ РЕМОНТНОЇ МАЙСТЕРНІ	69
ВИСНОВКИ.....	88
Література.....	91
ДОДАТКИ.....	95

ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ

1. Конструкція, умови роботи та причини втрати працездатності лапи культиватора
2. Критерії граничних станів (ГС) серійних лап
3. Способи відновлення та зміцнення робочих органів
4. Технологічні показники методів нанесення покриттів
5. Розподіл температури T вздовж осі ацетиленокисневого полум'я : 1-ядро;
2 – відновна зона; 3 – факел
6. Схема взаємодії речовин у розплавленому металі зварювальної ванни
7. Моделювання процесу зносу робочих поверхонь лапи культиватора
8. Процес взаємодії робочого органа з ґрунтом
9. Сили, що діють на частинки (сферу) у в'язкому металі
10. Методика проведення зносних випробувань у лабораторних та польових умовах
11. Методика нанесення порошкових сумішей технологією газополум'яного наплавлення
12. Результати зносних випробувань лап у польових умовах

ВСТУП

У сільському господарстві для обробки ґрунту застосовується велика кількість ґрунтообробних робочих органів - культиватори, розпушувачі та борони ін., Серед яких широко використовуються лапи культиваторів. При експлуатації лап культиваторів внаслідок прямого впливу абразивних частинок ґрунту інтенсивно зношуються, що негативно позначається на якості виконання робіт, а також на збільшенні опору тягового машин і знарядь. Зниження зношування, і, як наслідок, підвищення ресурсу лап культиваторів є однією з важливих та актуальних проблем. До найперспективніших підвищення ресурсу деталей машин є порошкові матеріали, нанесені поверхні робочих органів як покриттів. У той же час відомі технології нанесення покриттів з цих порошкових матеріалів є недостатньо ефективними для відновлення та зміцнення лап культиваторів. Таким чином, розробка ресурсозберігаючої технології для відновлення та зміцнення лап культиваторів за рахунок нанесення на їх поверхнях порошкових матеріалів сприятиме довговічності робочих органів вітчизняних та зарубіжних ґрунтообробних робочих органів.

1.ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

1.1 Конструкція, умови роботи та причини втрати працездатності лапи культиватора.

Обробка ґрунту займає важливе місце під час виробництва сільськогосподарських культур. Тому якісно підготовлений та обробіток ґрунт впливає і на врожайність, і на ефективність сільськогосподарського виробництва.

З оранкою або після її проведення застосовують поверхневу обробку ґрунту (лушення, культивація, боронування, розпушування, коткування, планування поверхні поля, шлейфування та ін), що здійснюється різними знаряддями на глибину до 16 см. Основним робочим органом ґрунтообробних машин є лапа культив. Виявлено, що ширина захоплення більшості лап знаходиться в інтервалі 220...410 мм. Ширину крила лапових органів найчастіше виготовляють що зменшується до кінця, значення якого становлять: максимальний розмір b_1 становить 45...75 мм, а мінімальний розмір b_2 відповідно 30...50 мм [2]. Для виготовлення лапових робочих органів приймають товщину матеріалу, при цьому керуються сукупністю факторів, до яких відносять: глибина обробки, фізико-механічні властивості оброблюваного ґрунту, ширина захоплення і ширина крил лапи, фізико-механічні та технологічні властивості матеріалу [2, 4]. Аналіз проведеного огляду дозволив визначити основні дефекти лап культиваторів, до яких відносять: затуплення лезової частини, зношування шкарпетки та крил по ширині на всій довжині, наявність деформацій та тріщин, злами, погнутість площини.



а



б

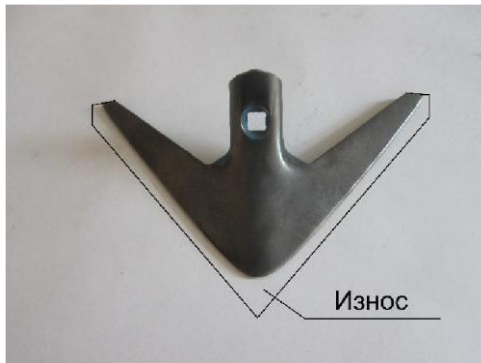


Рис. 1.1 – Зношені робочі органи: а - сівалки-культиватора Bouragult 8810; б - культиватор КПС-4Г; в - культиватор Lemken Kompaktor; г – культиватора КШУ-12Н [5, 7]

З рис. 1.1 видно, що максимальною інтенсивністю зношування лап є їх шкарпетка [3]. Найбільшої інтенсивності зношування схильний носок лапи. На різних ґрунтах її значення у 2,2...2,5 рази більше, ніж у крил лап [4]. Також виявлено, що з віддалення від носка лапи інтенсивність і величина її зношування знижується [2].

Встановлено, що тяговий опір лап встановлених у першому ряду ґрунтообробної машини, в середньому в 2 рази вище, ніж тяговий опір лап, встановлених у другому ряді.

Перший ряд лап обробляє недеформований ґрунт, а наступні ряди лап переміщуються вже частково обробленому ґрунту, встановлені на першому та наступних рядах ґрунтообробної машини, завжди мають різний знос [7]. Характерною особливістю конструкції лап є їхня симетричність, але знос по

крилах може бути неоднаковим і нерівномірним, що обумовлено такими причинами: неправильного регулювання агрегату, порушеннями розмірів та форми стійок кріплення (рис. 1.2) [6].

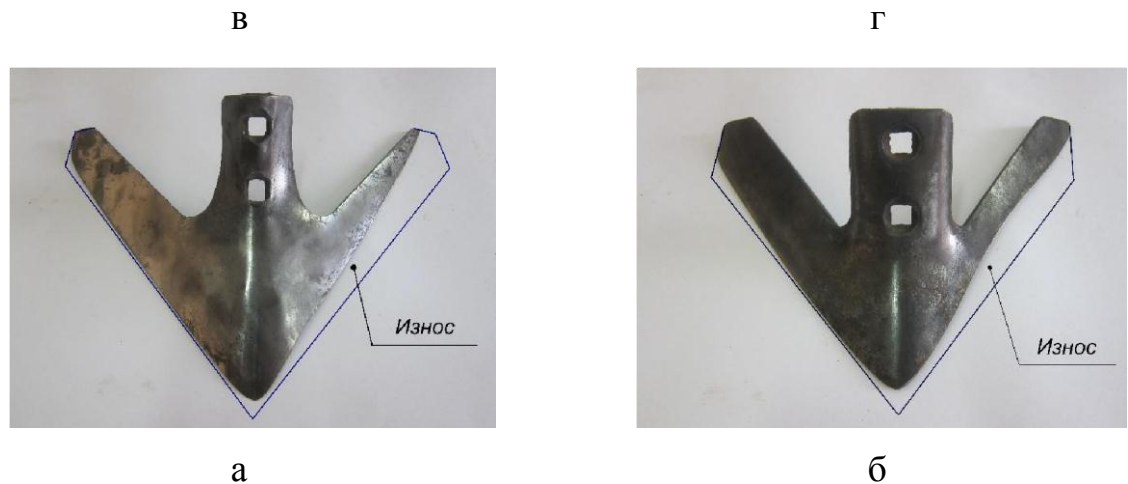


Рис. 1.2. – Робочі органи, що мають нерівномірне зношування крил [2]: а - лапа культиватора КШУ-12Н; б - посівний комплекс John Deere 730.

Фізико – механічні технологічні властивості ґрунту дуже впливають на характер зносу лап. У складі ґрунту найпоширенішим мінералом є кварц, твердість якого HV становить середньому 10,5...12,5 ГПа, а частка складі ґрунту дорівнює 75...85% [5, 8]. Залежно від зношує здатності лап, всі типи ґрунтів за ступенем абразивного впливу діляться на три наступні групи, які характеризуються коефіцієнтом зносу $K_{ізн.}$, що представляє собою відношення зносу стрілкової лапи досліджуваним ґрунтом до зносу цієї ж лапи еталонним середовищем (абразивної) в ідентичних ґрунтів. Значний вплив при експлуатації лап культиватора надає вологість ґрунту [5, 7].

Виявлено, що на глинистих та суглиннистих ґрунтах абсолютна вологість становить 14...18 %, такі ґрунти мають найменшу зношуючу здатність. Встановлено, що при зменшенні вологості від зазначених значень їх зношуюча здатність спочатку збільшується, а потім різко зменшується. Для супіщаних ґрунтів абсолютна вологість становить 14%, такі ґрунти характеризуються максимальним абразивним зносом. Зі збільшенням або

зменшенням вологості від зазначеного значення абразивне зношування даних ґрунтів зменшується. При абсолютній вологості 9...10% абразивний знос супіщаних ґрунтів мінімальний [8]. Проведеним аналізом встановлено основні критерії граничних станів серійних лап (таблиця 1.1)

Таблиця 1.1 Критерії граничних станів (ПС) серійних лап [4].

Встановлено, що експлуатація зношених лап культиваторів призводить до порушення заданої глибини обробки. Широка потилична фаска, утворена на ріжучій поверхні лапи, призводить до виникнення вертикальної складової реакції ґрунту, а також до нерівномірності глибини суцільної обробки. В результаті має місце виглиблення стрілкової лапи [8, 10]. Воно відбувається за рахунок того, що заглиблююча сила стає менше виштовхуючої сили [2].

1.2. Методи та матеріали відновлення та зміцнення лап культиватора.

В даний час відомо значну кількість способів відновлення та зміцнення робочих поверхонь (рис. 1.3).

Рис. 1.3 – Способи відновлення та зміцнення робочих органів [5].

Сутність даного методу полягає в тому, що твердість металу для сталей марки 45 досягає 40-46 HRC, а для сталей марки 65Г та легованих сталей досягає 55-61 HRC. Зносостійкість подібних робочих органів нижча порівняно з деталями, які виготовлені із спеціальних матеріалів. Так, при експлуатації робочих органів на суглинних ґрунтах ефект самозаточування не спостерігається [8]. У роботі [6] автор розглядає знос лап культиватора,

відновлених та зміцнених технологією індукційного загартовування (ширина шару гарту – 8–10 мм, 48–52 HRC) за сезон становитиме 30 мм.

Встановлено, що при застосуванні даного методу відновлення та зміцнення не забезпечується якість обробки. Тому дана технологія не знайшла свого застосування в сільськогосподарському виробництві через деякі недоліки, такі як складність технології, відсутність обладнання та її оснащення, а також високу собівартість. Встановлено, що твердість основного та наплавленого металів змінюється у співвідношенні 1:1,5...1:3,0. Варіюючи технологічними режимами (напруга, сила струму, час наплавлення, виліт електрода, полярність, швидкість подачі дроту та ін.) можна змінити геометрію наплавлених точок. Таким чином, створюється пилкоподібна ріжуча поверхня робочого органу [12].

Однак: лапи, відновлені технологією точкового зміцнення, мають здатність фарбування, що спричинює підвищений знос робочих поверхонь.

Існуючі методи газотермічних нанесень класифікуються за видом енергії та джерелом теплоти. За видом енергії у свою чергу поділяються на газоелектричні, в яких використовуються електроенергія та газополум'яні методи, за рахунок згоряння горючих газів утворюється теплова енергія. Різновиди джерел теплоти (дуга, плазма і газове полум'я) використовують для нагрівання матеріалу, що розпилюється [14].

Методи наплавки називають дуговою металізацією, плазмовим наплавленням, газополум'яним наплавленням і детонаційно-газовим наплавленням. До газоелектричних відносяться перші два методи, останні – до газополум'яних. Методи газотермічних нанесень характеризуються ефективністю процесу, до яких відносять: коефіцієнт використання енергії, що підводиться, коефіцієнт використання металу, що наплавляється, продуктивність процесу, якість покриття і вартістю їх нанесення [14]. Встановлено, що дугова металізація переважніше порівняно з іншими способами газотермічних нанесень теплової ефективності, продуктивності, а також вартості покриттів. Виявлено, що ефективний ККД нагрівання даного

способу в середньому становить зазвичай 60%, тобто частка енергією, що підводиться, йде на нагрівання і плавлення розпилюваного матеріалу. Однак, до недоліку даного способу можна віднести наступне: типове обладнання для даного способу не дозволяє отримати високоякісне покриття, пов'язане з фізико - хімічними особливостями процесу [13]. Для збільшення зносостійкості лапи культиватора існує інший метод газотермічного нанесення - газополум'яний, що відрізняється своєю простотою, дешевизною та мобільністю. Відсутність чадючих елементів, велика продуктивність при високому коефіцієнті використання матеріалу забезпечують переваги цього методу порівняно з плазмовим та детонаційним напиленням, а також з електродуговою металізацією (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 Технологічні показники методів нанесення покриттів.

Проведений аналіз способів відновлення та зміцнення лап культиваторів показав, що газополум'яна наплавка є одним з найбільш перспективних. Даний спосіб дозволяє підвищити зносостійкість і довговічність зміцнених робочих поверхонь лап культиватора, обладнання відрізняється простотою конструкції і оснащення, і невисокою вартістю. Технологія газополум'яного наплавлення дозволяє отримувати зносостійкі покриття на робочих поверхнях лап культиваторів. Використання оплавлених покриттів із порошків, що самофлюсуються, дозволяє досягти високої термостійкості і хімічної стійкості в багатьох середовищах.

Процес газополум'яної наплавки полягає в тому, що порошкова суміш 2 надходить у високотемпературний потік газів 1 у твердому стані. Частинки порошку нагріваються під час руху ділянки А. Відповідно до закону газодинаміки, частинки одночасно розподіляються в газовому потоці 3, і прискорюються на ділянці Б. Далі на ділянці У частки спрямовано переміщуються до основи 5, і утворюють на ній 4 покриття [8]. Загальна схема процесу газополум'яної наплавки представлена рис. 1.4

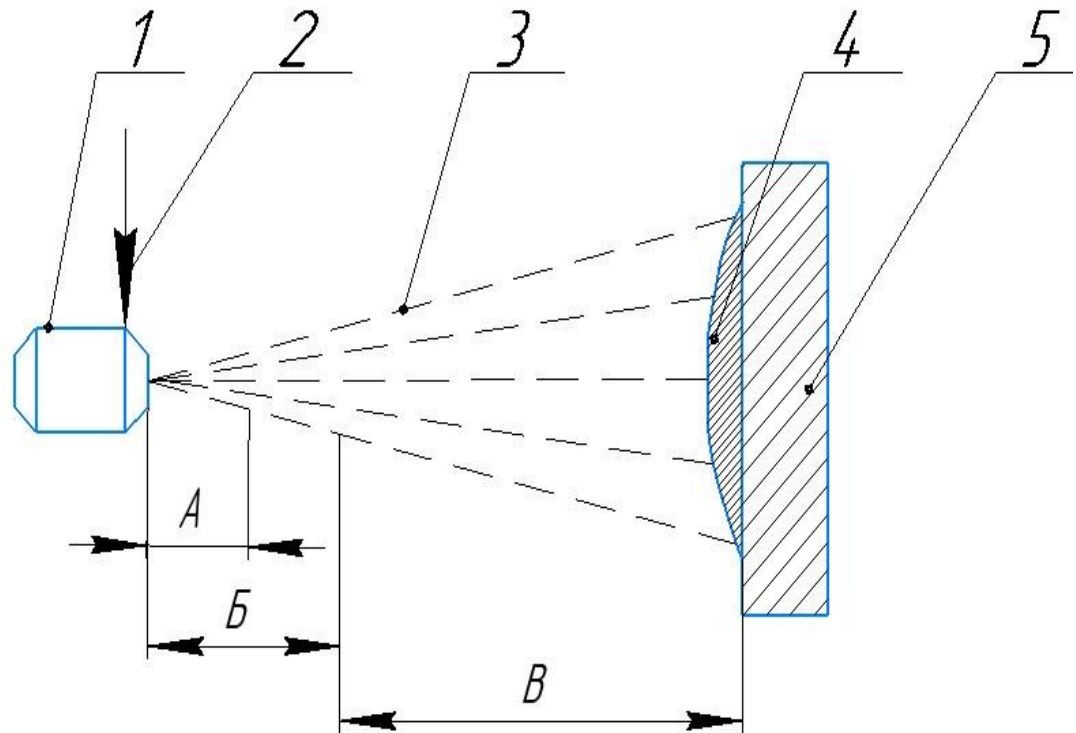


Рис. 1.4 - Схема процесу газополум'яного наплавлення для порошкових матеріалів [10] : А - область нагрівання вихідного матеріалу до початку плавлення; Б - область нагріву до повного плавлення; матеріала в розплавленому стані (можливе перегрів, випаровування); 1 - пальник; 2 - порошок; 3 - розплавлені частки порошку; 4 - покриття; 5 - основа (деталь).

Таким чином, розглянуті технології відновлення і зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин дозволяють отримати покриття на робочих поверхнях, що дозволяють відновити агротехнологічні розміри робочих органів. порошкових матеріалів, що використовуються за технології газополум'яного наплавлення.

1.3. Утворення зварювального полум'я та теплові характеристики при газополум'яному напавленні.

Реакція горіння протікає при поєднанні твердих, рідких чи газоподібних речовин із киснем. Для процесу газополум'яної наплавки найбільше значення має горіння різних горючих газів у кисні чи повітрі. Горіння газової суміші починається з її займання за певної температури, що залежить від умов процесу горіння [11]. Встановлено, що стійкий процес горіння можливий лише в тому випадку, якщо кількості теплоти, що виділяється при згорянні горючої суміші, достатньо для нагрівання нових порцій газу і компенсації втрат теплоти в навколишнє середовище. Необхідна умова горіння газу в кисні або повітрі - вміст палива в суміші в певних межах, званих межами займання [8]. Залежно від перебігу реакції згорання ацетилену газове ацетиленокисневе полум'я має певну форму (рисунок 1.6). У внутрішній частині ядра 1 полум'я відбувається поступовий підігрів до температури займання газової суміші, що надходить з мундштуку пальника. В ядрі полум'я відбувається термічне розкладання ацетилену, яке прискорюється за рахунок присутності в ядрі кисню, що подається в пальник. Ацетилен в ядрі полум'я розкладається за реакцією



Вуглець, що утворюється, являє собою найдрібніші тверді частинки, що оточують тонким розпеченим шаром ядро полум'я, викликаючи його свічення.

Оболонка ядра є найяскравішою частиною газового полум'я із температурою близько 1500 °З [11]. У середній зоні 2 полум'я протікає неповне окислення вуглецю киснем, що знаходиться в суміші, за реакцією:

$$2\text{C} + \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO} + \text{H}_2. \quad (1.2)$$

Встановлено, що теплота, що виділяється, сприяє підігріву суміші і прискоренню протікають в ній окислювальних процесів.

Відновлювальна зона 2 характеризується максимальною температурою (рис. 1.5). У факелі 3 полум'я відбувається догорання оксиду вуглецю і водню при їх взаємодії з киснем, що надходить з повітря [12]:



із виділенням великої кількості теплоти. Однак через великий обсяг зони факела 3 температура в ній нижче, ніж у середній зоні 2.

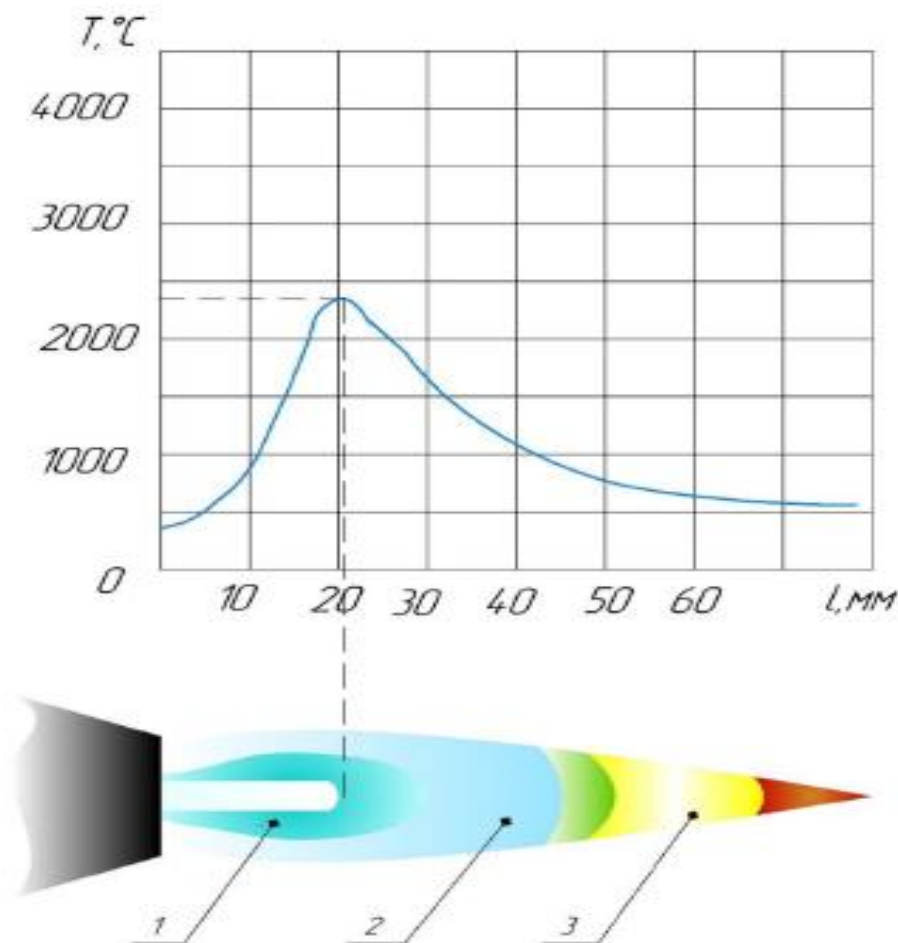


Рис. 1.5. - Розподіл температури T вздовж осі ацетиленокисневого полум'я : 1-ядро; 2 – відновна зона; 3 – факел.

Встановлено, що для утворення полум'я та повного згорання ацетилену необхідно на кожен його обсяг підводити в пальник такий самий обсяг кисню (відношення $\beta = V_{\text{к}}/V_{\text{а}} = 1$) [13].

Таблиця 1.3 Види полум'я та його характеристики

Середня зона, маючи у своєму складі оксид вуглецю CO і водень H, має і відновлювальні властивості, то наплавку, здійснюють саме цією зоною, маючи пальник так, щоб ядро полум'я відстояло від поверхні металу на відстані 2 ... 3 мм [8].

Встановлено, що істотний вплив на температуру полум'я надає співвідношення суміші пального газу з киснем. Температура ацетиленокисневого полум'я пальника з питомою витратою ацетилену 250...400 дм³/год при співвідношенні суміші газів $\beta = 1,1...1,2$ залежно від відстані до внутрішнього ядра полум'я змінюється таким чином (таблиця 1.4) [78].

Таблиця 1.4 - Питома витрата полум'я залежно від відстані до внутрішнього ядра полум'я

У загальному вигляді питомий тепловий потік полум'я q_2 , що являє собою кількість теплоти, що вводиться полум'ям за одиницю часу через одиницю площі поверхні металу, що нагрівається, можна виразити правилом Ньютона:

$$q_2 = a (T_p - T), \quad (1.4)$$

де a - коефіцієнт теплообміну між полум'ям і металом, що дорівнює сумі коефіцієнтів вимушеного конвективного та променистого теплообміну, Вт/(м²К);

T_p - температура потоку газів полум'я, К;

T - температура поверхні металу, яку спрямований потік полум'я, Со. Коефіцієнт a в процесі нагрівання металу та збільшення його температури зменшується [8]. Рідкий метал зварювальної ванни стикається з газами та

шлаками, що утворюються внаслідок окислення поверхневих шарів металу. Кисень O_2 та азот N надходять у зварювальну ванну з повітря. Кисень може також надходити і з газової суміші, що подається пальником. Водень H_2 потрапляє в основному з полум'я, а також в результаті взаємодії деяких металів з вологою при розкладанні водяної пари або вуглеводнів, що входять до складу забруднень, що залишилися на кромках деталей після очищення їх перед наплавленням [9]. Взаємодія газів із металом зварювальної ванни може бути різною. Так, наприклад, кисень O_2 активно з'єднується з такими металами, як нікель Ni , марганець Mn та залізо Fe [14]. При газополум'яній наплавці на розплавлений метал зварювальної ванни активно впливає газовий потік середньої зони полум'я, що містить оксид вуглецю, водень H_2 , пари води H_2O , діоксид вуглецю CO_2 , атомарний водень H , кисень O_2 і азот N_2 .

У відновлювальній зоні полум'я можлива також наявність у незначній кількості вільного вуглецю C , що не встиг повністю окислитися в оксид вуглецю на межі ядра полум'я [7].

Характер реакцій, що протікають у зварювальній ванні, визначається складом середньої зони полум'я, що залежить від співвідношення газів у горючій суміші. Інші реакції зварювальної ванни - реакції окислення та відновлення [12]. Може відбуватися його збагачення киснем, а за деяких умов - воднем H_2 , азотом N і вуглецем C . Так, при наплавленні порошкової суміші, що представляє собою сплав нікелю Ni з вуглецем з присутніми у вигляді домішок і домішок хромом Cr , металі зварювальної ванни має вигляд, представлений рис. 1.6.

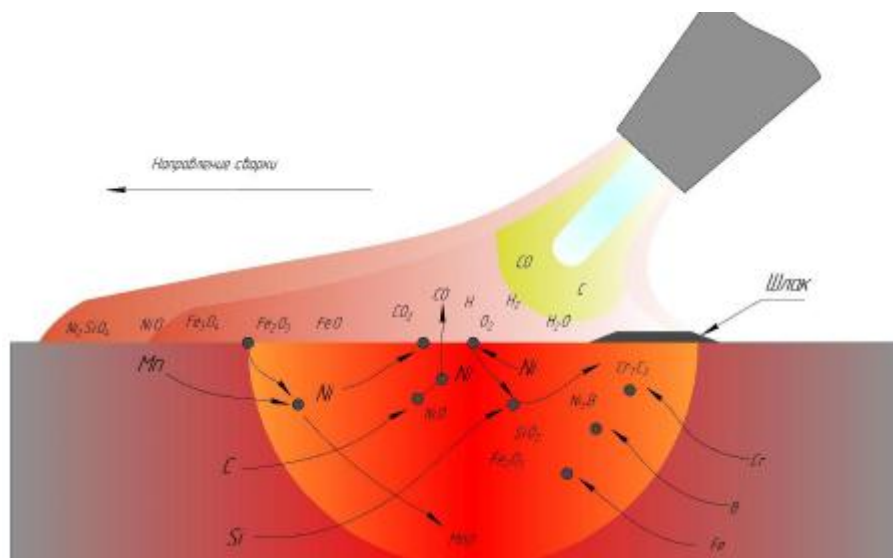


Рис. 1.6 - Схема взаємодії речовин у розплавленому металі зварювальної ванни.

2. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОПИС МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ.

2.1. Моделювання процесу зносу робочих поверхонь лапи культиватора.

Взаємодія робочих органів ґрунтообробних машин із ґрунтовим середовищем при їх розробці або ущільненні супроводжується їх деформацією, руйнуванням та переміщенням [12].

Тому при аналізі взаємодії робочих органів із ґрунтом та визначенні опорів, що виникають при цьому, необхідно враховувати фізико-механічні властивості ґрунтів основні конструктивні особливості робочих органів та способи їх впливу на ґрунт [14]. Розглянемо процес взаємодії технологічних властивостей ґрунту на клин робочого органу. Під технологічними

властивостями ґрунту слід розуміти лише ті його фізичні властивості, які суттєво впливають на закономірності та характер перебігу технологічних процесів її механічної обробки. До технологічних властивостей ґрунту відносять міцнісні, фрикційні, липкість, пластичність, пружність, в'язкість і крихкість [19]. Фрикційні властивості ґрунту надають значний вплив на процеси механічної обробки ґрунту, що виникають внаслідок ковзання ґрунту щодо іншого тіла, що знаходиться з ним у контакті (зовнішнє тертя), або ковзання частинок, що становлять ґрунт відносно один одного (внутрішнє тертя) [8]. Сила тертя – це сила опору переміщенню, що виникає від дії активної сили, що прагне створити ковзання поверхні одного тіла щодо іншого при нормальному тиску. Сила тертя $F_{тр}$ завжди знаходиться у площині взаємодії тіл і спрямована у протилежний бік від активної сили [9]. Максимальне значення $F_{тр}$ досягає при ковзанні, чисельне значення якого визначається [9]:

$$F_{mp} = F_{max} = fN, \quad (2.1)$$

де F -сила тертя, Н;

N – сила нормального тиску чи реакції опори, Н;

f – коефіцієнт тертя.

Звідси

$$f = \frac{F_{mp}}{N} = tg\varphi, \quad (2.2)$$

де φ -кут тертя;

f і φ – не постійні.

Вони змінюються залежно від механічного складу, вологості ґрунту, швидкості відносного руху, площі поверхні та її стану. Чисельні значення f перебувають у інтервалі 0,25...0,90, φ – 14°...42°. Встановлено, що у тертя

значний вплив надає вологість ґрунту [18]. На рис. 2.1 представлено залежність коефіцієнта сили тертя ґрунту від вологості ґрунту.

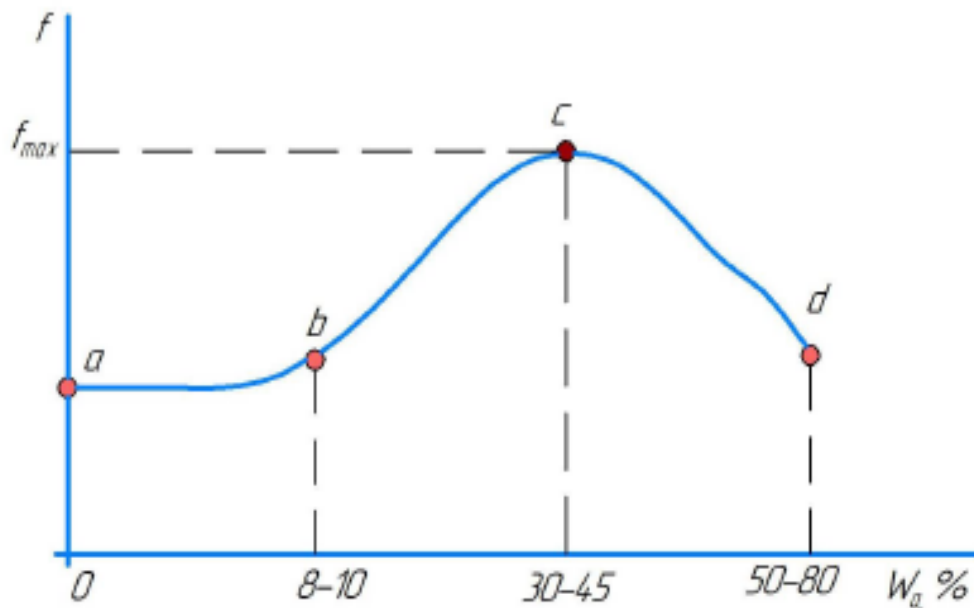


Рисунок 2.1 – Залежність коефіцієнта тертя від вологості ґрунту [8].

Аналізуючи залежність представленого рис. 2.1 можна сказати, що з низької вологості ґрунту від 0 до 8... 10% ґрунтова волога прилипає до металу (відрізок ab), тобто. має місце «справжнє тертя», і коефіцієнт тертя залежить від вологості [18].

Збільшення коефіцієнта тертя f (відрізок bc) пояснюється виникненням сил молекулярного тяжіння ґрунтових частинок до металу робочого органа. Відповідно, коли вологість збільшується до 50... 80%, вона відіграє роль мастила, тому коефіцієнт тертя f зменшується (крива cd). Таким чином, коефіцієнт тертя f впливає механічний склад ґрунту малюнок 2.2, т. е. вміст фізичної глини (частки менше 0,1 мм) [15].

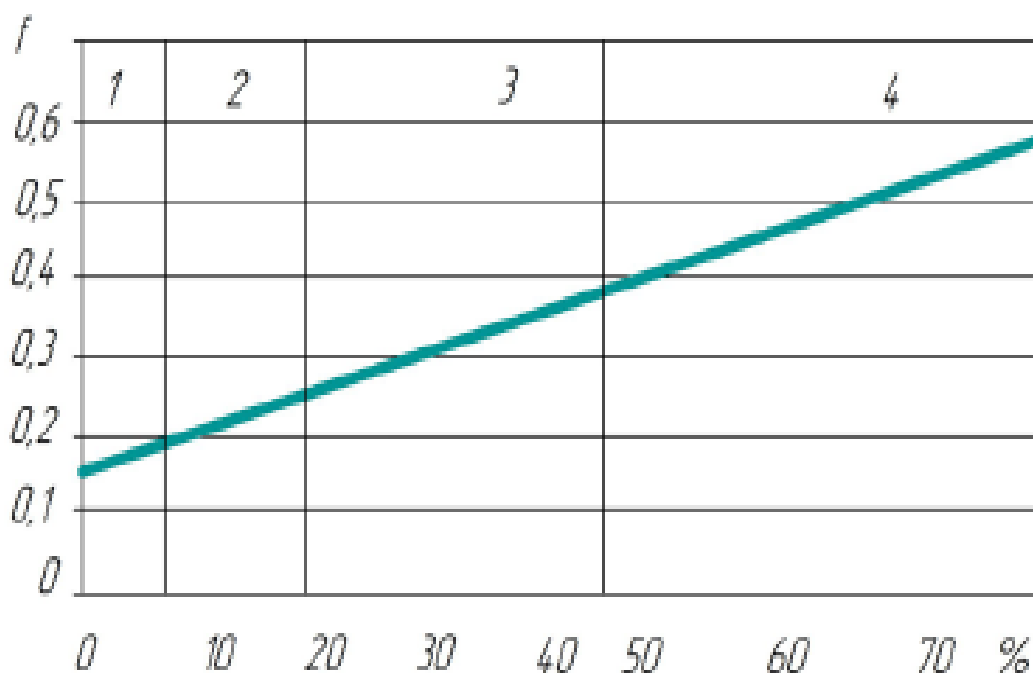


Рис. 2.2 – Залежність коефіцієнта тертя ґрунту про сталь від вмісту у ґрунті «фізичної глини»: 1 – Супісь; 2 – суглинок; 3 – суглинистий чорнозем; 4 – глинистий чорнозем.

З графіка видно (рис. 2.2), що із зростанням відсоткового змісту «фізичної глини» коефіцієнт тертя збільшується.

Це тим, що з малозв'язних піщаних ґрунтів окремі частинки не ковзають, а перекочуються на поверхні металу (тертя кочення) унаслідок чого сила тертя зменшується [9]. Встановлено, що покращення структури ґрунту призводить до зменшення f , що пояснюється зменшенням площі дійсного контакту ґрунту зі сталлю [9]. Знос робочих органів є загальною проблемою для всіх ґрунтообробних машин. Визначальним наслідком зносу є не стільки збільшення тягового опору та відповідне збільшення витрати палива, скільки погіршення якості обробітку ґрунту та, як наслідок, зниження врожайності.

При переміщенні пласта ґрунту по клину робочого органу в точці М на робочу поверхню діють сили: маса пласта G , динамічний тиск R та сила тертя $F_{\text{тр}}$, N тиск ґрунту на лапу [16].

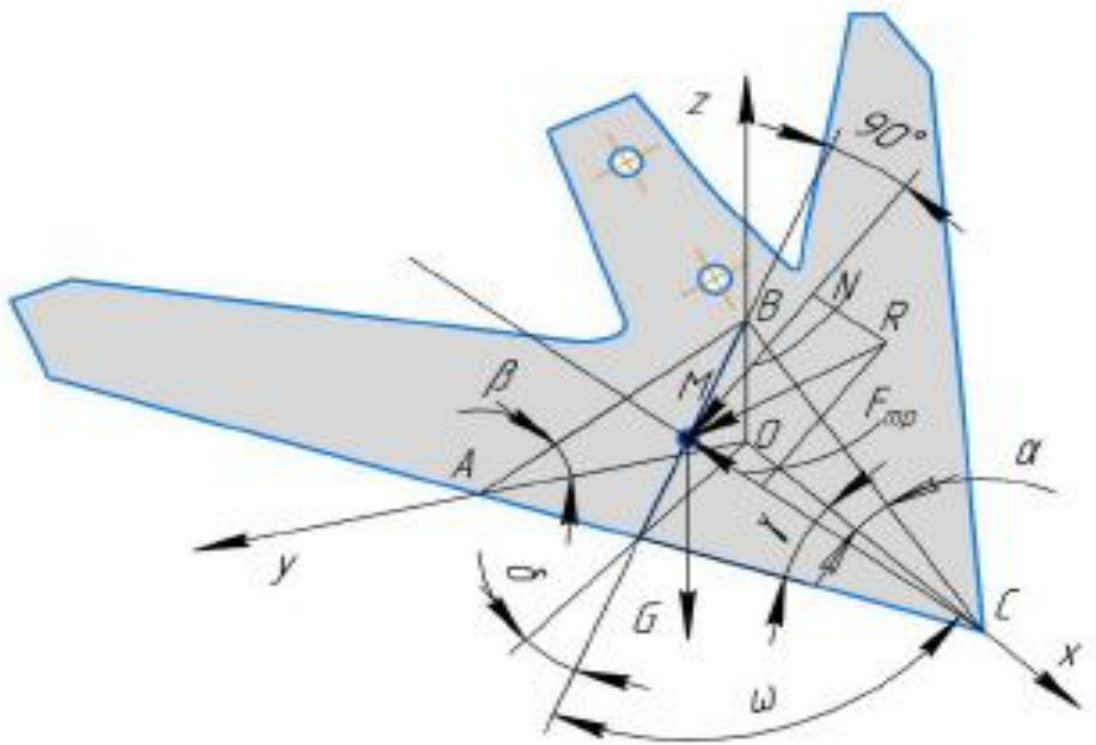


Рис. 2.3 – Схема дії сил та напрямки руху частинок ґрунту по лезу робочого органу: α - кут кришення; β – кут обороту; γ – кут руху .

Великий вплив має при технологічному процесі кут кришення α , що лежить на вертикально – поздовжній площині та вимірюється між поверхнею лапи та горизонтом [11]. З $\triangle COB$ можна визначити кут кришення α

$$\frac{OB}{CO} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.3)$$

З $\triangle COA$ визначимо

$$\frac{OA}{CO} = \sin \alpha, \quad (2.4)$$

Перетворивши, отримаємо катет трикутника АОС

$$CO = \frac{OA}{\sin \alpha}, \quad (2.5)$$

Підставляючи значення СО в рівняння, що визначає $\tan \alpha$, отримаємо

$$\frac{OB}{CO} = \frac{OB}{OA} \sin \alpha, \quad (2.6)$$

Відповідно до схеми, представленої рис. 2.3 визначимо кут оборота β

$$\frac{CB}{OA} = \tan \beta, \quad (2.7)$$

Тоді отримаємо через співвідношення кутів

$$\tan \alpha = \tan \beta \sin \gamma, \quad (2.8)$$

$$\alpha = \arctg(\tan \beta \sin \gamma),$$

Якщо рівняння 2.8 підставити характерні для існуючих лап значення кутів β і γ , можна визначити такі значення кутів кришення ґрунту: у плоскорізальних лап $\alpha \approx 9 \dots 10^\circ$, в універсальних $\alpha \approx 16^\circ$.

Для лапових робочих органів набувають значення кутів $25 \dots 45^\circ$ [11]. Далі необхідно визначити силу тертя ґрунту про лапу культиватора. На рис. 2.4 представлено розрахункову схему визначення сил взаємодії лапи з ґрунтом.

При русі лапи у ґрунті чинить тиск N , який спрямований за нормаллю до леза. Однак, тертя ґрунту про лезо лапи відхиляє силу N на кут кришення α , така сила тертя, що виникає при цьому, згідно з :

$$F_{\text{тр}} = N \tan \varphi. \quad (2.9)$$

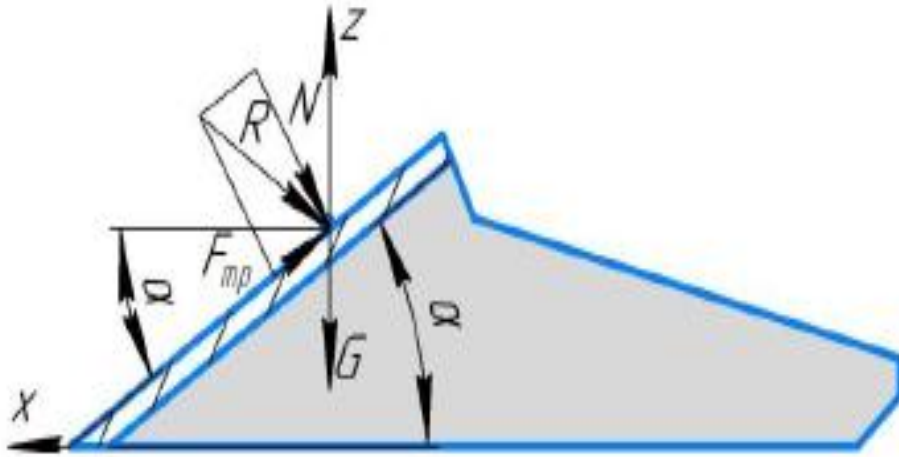


Рис. - 2.4. Схема визначення сил взаємодії лапи із ґрунтом.

З схеми, представленої рис. 2.4 складаємо рівняння рівноваги на систему координат визначення сили тертя $F_{тр}$.

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0; F_{mp} \cos \alpha + N \sin \alpha = 0, \\ \sum F_y &= 0; -G - N \cos \alpha + F_{mp} \sin \alpha = 0,\end{aligned}\quad (2.10)$$

З формули (2.10) визначили тиск ґрунту N

$$N = \frac{F_{mp} \cos \alpha}{\sin \alpha}, \quad (2.11)$$

Відповідно до рівняння 2.11 визначимо силу тертя

$$F_{mp} = \frac{G}{\frac{\cos \alpha \cos \alpha}{\sin \alpha} + \sin \alpha}, \quad (2.12)$$

Підставивши в рівняння (2.11) визначимо силу тертя

$$\begin{aligned}-G + \frac{F_{mp} \cos \alpha}{\sin \alpha} \times \cos \alpha + F_{mp} \sin \alpha &= 0, \\ F_{mp} \left(\frac{\cos \alpha \times \cos \alpha}{\sin \alpha} + \sin \alpha \right) - G &= 0, \\ F_{mp} &= fN = fN \cos \alpha,\end{aligned}\quad (2.14)$$

де N – нормальна сила, Н;

f – коефіцієнт тертя; φ – кут тертя.

Сила тертя є пасивною силою (реакцією).

Тому вона не може бути більшою за fN , але може бути як завгодно мала, якщо мала сила, що прагне викликати відносне переміщення двох тіл.

Отже, сила тертя $F_{тр}$, яка визначається виразом (2.14), гранична.

Зміна коефіцієнта тертя f ґрунту про лапу залежно від вологості та вмісту у ґрунті абразиву представлені на рис. 2.1 та 2.2.

Для кожного ґрунту є своє значення вологості, при якій коефіцієнт тертя досягає максимуму [19]. Встановлено, що з звичайного чорнозему $W_A \approx 30\%$ [9,18]. При моделюванні технологічного процесу обробітку ґрунту застосовують як середовище гідродинамічну модель середовища, яке найбільш повно описує процес роботи.

В основу гідродинамічної моделі лежить загальна система рівнянь динаміки суцільної в'язкої середовища (Ньютонівська рідина), яка виглядає так [13]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial V_x}{\partial x} V_x + \frac{\partial V_x}{\partial y} V_y + \frac{\partial V_x}{\partial z} V_z &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + (1 + 5\alpha) \mu \nabla^2 V_x \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} + \frac{\partial V_y}{\partial x} V_x + \frac{\partial V_y}{\partial y} V_y + \frac{\partial V_y}{\partial z} V_z &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + (1 + 5\alpha) \mu \nabla^2 V_y \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} + \frac{\partial V_z}{\partial x} V_x + \frac{\partial V_z}{\partial y} V_y + \frac{\partial V_z}{\partial z} V_z &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + (1 + 5\alpha) \mu \nabla^2 V_z \\ \nabla^2 V_i &= \frac{\partial^2 V_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_i}{\partial z^2}, \quad i = x, y, z \\ \frac{dp}{dt} + \operatorname{div}(\rho v) &= M \end{aligned} \tag{2.15}$$

де ρ – об'ємна маса ґрунту в цій зоні, кг/м³;

α – коефіцієнт вмісту твердих частинок обсягом ґрунту, $\alpha = 0,3 \dots 0,7$;

v_i , – проекції швидкостей частинок ґрунту, м/с; p – тиск, Н/м²;

F_i – проекції об'ємних сил, Н/кг;

μ – динамічна в'язкість середовища Па·с.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_i}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_i}{\partial z} v_z = F_i - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial i} \right) + (1 + 5\alpha) \mu \nabla^2 v_i;$$

$$\frac{d(v_x)}{dx} + \frac{d(v_y)}{dy} + \frac{d(v_z)}{dz} = 0,$$
(2.16)

Для вирішення даної системи рівнянь необхідно встановити граничні умови функціонування моделі (рис. 2.5) [20].

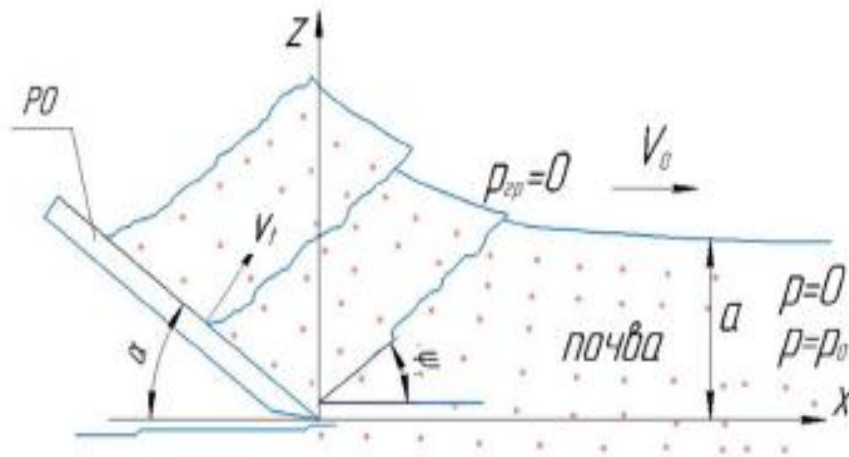


Рис.2.5.Процес взаємодії робочого органа з ґрунтом.

При моделюванні технологічного процесу роботи клинів були допущені деякі припущення [14]:

1. Ґрунтова маса однорідна по всьому об'єму.
2. Швидкість руху робочого органу стала (тобто. $V_p = \text{const}$).
3. Рух робочого органу рівномірний.

Таким чином, встановлено, що на зношування робочих органів впливає тиск ґрунту, його вологість і в'язкість, тому розроблена схема процесу взаємодії робочого органу з ґрунтовим середовищем дозволила описати процес математичної моделі, але для моделювання технологічного процесу в прикладній програмі необхідно задати його граничні умови [20].

Рис. 2.6 - Розрахункова область моделі процесу обробітку ґрунту.

Розміри паралелепіпеда визначаються залежно від розмірів зони розподілу деформації у ґрунті від робочого органу з деяким запасом. При обробітку ґрунту відбувається його сколювання під деяким кутом Θ щодо вертикальної площини. Кут зсуву Θ щодо вертикальної площини визначається виразом

$$\Theta = 45^\circ + 0,5\varphi$$

де φ – кут внутрішнього тертя ґрунту, град. Звідси кут зсуву щодо напрямку руху [20] $\psi = 90^\circ - \Theta$, тобто. $\psi = 45^\circ - 0,5\varphi$.

$$L_{\varphi} > \frac{a}{\operatorname{tg} \psi} = \frac{a}{\operatorname{tg}(45^\circ - 0,5\varphi)}, \quad (2.17)$$

де a - глибина ходу робочого органу, м.

З урахуванням певного коефіцієнта запасу, що враховує неоднорідність та анізотропність ґрунтового середовища в поздовжній площині, а також роль динамічного фактора тиску ґрунтового пласта довжина розрахункової області має бути [20]

$$L_{po} = L + 2k_z L_{\varphi}, \quad (2.18)$$

де L – геометричний розмір робочого органу, м;

$k_z = 1,5 \dots 2$ – коефіцієнт запасу.

У поздовжній площині ширина розрахункової області B_{po} (рис. 2.5) повинна бути встановлена з урахуванням ширини робочого органу B_r або всього знаряддя (якщо розглядається взаємодія всього знаряддя)

$$B_{po} = B_r + 2 \frac{a}{\operatorname{tg}(45^\circ - 0,5\varphi)}, \quad (2.19)$$

Висота розрахункової області H_{po} повинна бути дещо більшою за розмір робочого органу h_p по вертикалі. Вона залежить від глибини обробки і не повинна впливати на зону поширення деформації [71].

2.2. Фізична природа утворення покриття при газополум'яному наплавленні.

На процес газополум'яної наплавки впливає велика кількість незалежних факторів, а також неконтрольовані та некеровані фактори, що утворюють шум у системі, які називають збурюючими факторами [17, 21]. Математичні методи моделювання дозволяють отримати формалізований опис основних закономірностей показників якості наплавленого шару від основних незалежних керованих факторів та визначити найкраще їхнє поєднання.

Основними показниками, що визначають якість наплавленого покриття за технології газополум'яної наплавки, є відносна зносостійкість ϵ ; адгезійна міцність σ_a ; когезійна міцність σ_k ; пористість та ін. [13, 15]. Якість наплавленого шару на лапу культиватора визначається режимами технології газополум'яної наплавки. Недотримання режимів наплавлення призводить до погіршення якості наплавлення, наприклад, в результаті перегріву або недогріву металу, що наплавляється, недостатньої або надмірної швидкості введення розплаву і компонентів порошкового матеріалу та ін. Звідси впливає необхідність визначення оптимальних значень незалежних факторів, що визначають режим технології газополум'яної наплавки, за яких ефективність цієї технології буде найбільшою, а витрати найменшими [6, 18].

Як критерій оптимізації, що характеризує якість наплавленого, відновленого та зміцненого шару технологією газополум'яної наплавки

надалі приймаємо, як найбільш важливий параметр, показник - зносостійкість ε [11, 15].

Оптимальні значення цього показника визначаються механічними режимами технології газополум'яної наплавки.

Забезпечення режимів нанесення наплавленого шару визначається сукупністю наступних незалежних змінних: температура нагрівання поверхні основного металу (підкладки) - $T_{\text{п}}, ^\circ \text{C}$, час наплавлення порошкової суміші - $t_{\text{цикла}}, \text{с}$; швидкість подачі частинок - $v_{\text{ч}}, \text{м/с}$; витрата кисню - $R_{\text{х}}, \text{м}^3/\text{год}$; температура наплавленого шару - $T_{\text{ш}}, ^\circ \text{C}$ [14, 19].

На основі апріорної інформації, а також на підставі власних досліджень вищезгадані змінні повністю характеризують процес газополум'яної наплавки, тому обрані нами як незалежні фактори для визначення зміцнювальних та відновлених властивостей робочих поверхонь лап культиваторів.

Необхідно відзначити, що час технологічного циклу наплавлення порошкової суміші $t_{\text{цикл}}$ на робочу поверхню включає час наступних технологічних операцій: нагрівання поверхні основного металу t_1 ; подачі порошкової суміші до поверхні та нанесення порошкового матеріалу на поверхню t_2 .

Для визначення функціональної залежності між обраним критерієм оптимізації та керованими факторами прийнято метод багатofакторного планування експерименту з використанням плану Бокса-Бенкена. Покриття при газополум'яній наплавці формується шляхом нанесення, на поверхню, що відновлюється і зміцнюється, що перекривають один одного по довжині і по ширині одиничних майданчиків. На рис. 2.7 представлено схему формування одного такого майданчика [197]. Кожен термомеханічний цикл нанесення одиничних майданчиків полягає в нагріванні поверхневого шару основного металу тривалістю від 5 до 7 с, подачі порошкової суміші до

поверхні основного металу тривалістю від 1 до 3 с і наплавлення порошкової суміші на поверхню.

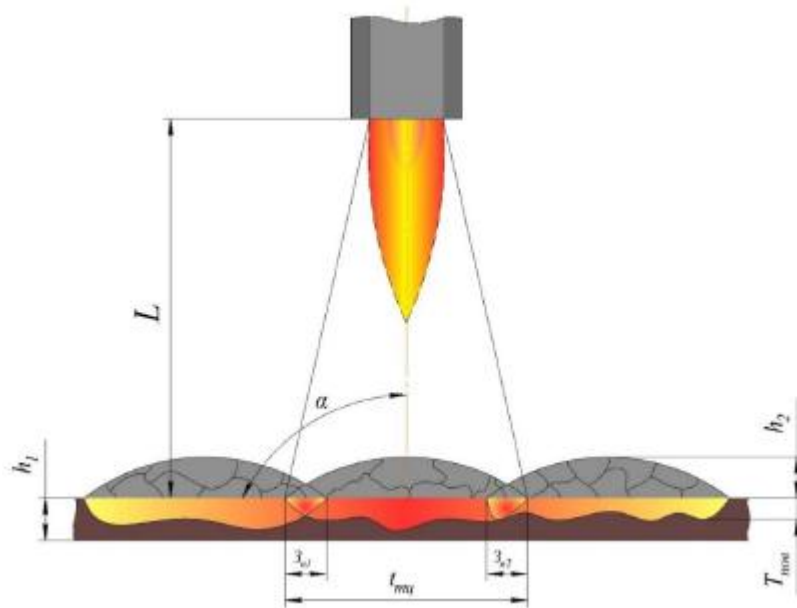


Рис. 2.7. – Формування одиничного майданчика наплавленого покриття:

h_1 – товщина основного металу; h_2 – товщина наплавленого шару; t_{tc} - час технологічного циклу (нагрів та подача); $З_{п1}$, $З_{п2}$ – зони перекриття; $T_{пов}$ - нагрівання приповерхневого шару основного металу; α – кут наплавлення; L - дистанція наплавлення.

Таким чином, кожен наступний одиничний майданчик перекриває попередній, раніше наплавлений. Порошкова суміш наплавляється на робочу поверхню лапи культиватора по безперервній суцільній лінії, причому кожен одиничний ділянку, що наплавляється, наноситься з деяким перекриттям їх по ширині. Таким чином, на зношеній поверхні [17] робочого органу формуємо суцільне покриття.

2.3. Математична модель осідання наплавлених частинок при газополум'яному наплавленні.

Характерною загальною властивістю порошкових сумішей є схильність до осідання або спливу частинок дисперсної фази. Для дослідження седиментаційного аналізу наплавлених часток необхідно вивести рівняння швидкості руху однієї частки. За описаною методикою проведеного експерименту розділ 3 встановили, що форма частинок металевого порошку на основі нікелю ПГ12Н-02 має сферичну форму. Для опису седиментаційного аналізу наплавлених частинок розглянули рух твердої кулястої частинки діаметром d рідкому середовищі [3, 8, 15].

На рис. 2.8 представлені сили, що діють на частинку (сферу) у в'язкому металі.

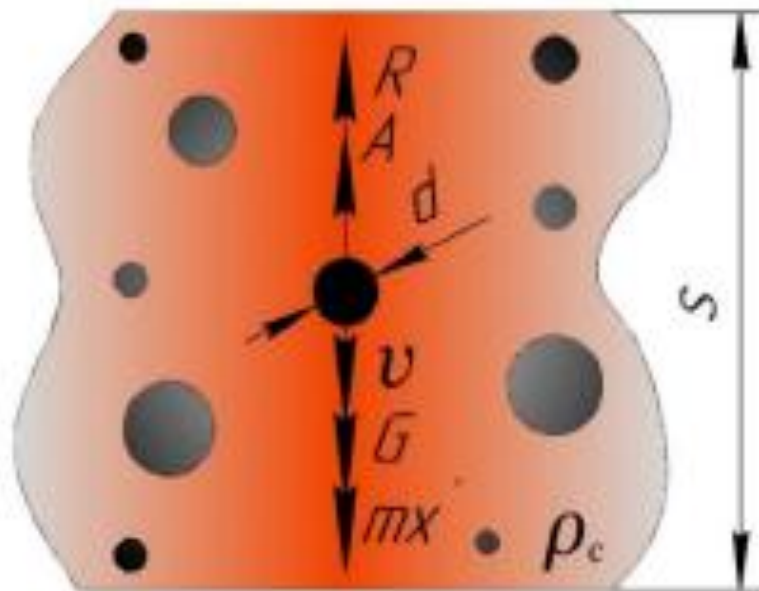


Рис. 2.8 - Сили, що діють на частинки (сферу) у в'язкому металі :

R – гідродинамічний опір; A – сила Архімеда; G - Гравітаційна сила; mx'' - прискорення частки; v - швидкість частки; d - діаметр частинок; s - характерний розмір шару, що наплавляється; ρ_c – щільність сполучного металу .

$$A = \rho_c \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g, \quad (2.20)$$

де ρ_c - густина рідкого (сполучного) металу, г/см³;

d – еквівалентний діаметр частинки, мм;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Вагу частинок визнач за формулою:

$$G = m \cdot g = \rho_r \cdot V_r \cdot g = \rho_c \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g, \quad (2.21)$$

де m – маса зерен;

ρ_r - густина зерен, г/см³;

V_r – об'єм зерен, см³.

Силу гідродинамічного опору можна визначити за формулою

$$R = \xi \cdot \frac{\rho_c \cdot v^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (2.22)$$

де ξ - коефіцієнт опору середовища;

v - швидкість осідання частки рідини;

$v = \text{const}$ – швидкість вильоту частинок з мундштука пальника.

У перший момент частка осідає з деяким прискоренням mx'' , потім - з постійною швидкістю v .

При виведенні рівняння Стокса виходили з розгляду умови рівноваги сил, що діють на сферичну частинку, що осідає в рідині з постійною швидкістю, та розглянули рівняння у такому вигляді:

$$G = R \cdot A, \quad (2.23)$$

З формули (2.22) визначаємо силу гідродинамічного опору

$$R = G - A, \quad (2.24)$$

Підставляючи в рівняння (2.21) вирази (2.42), (2.43), (2.44) отримаємо наступне

$$\xi \cdot \frac{\rho_c \cdot v^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \left(\rho_r \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g \right) - \left(\rho_c \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g \right) \quad (2.25)$$

З отриманого виразу (2.25) можна визначити швидкість спливу частинок

$$v = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{d \cdot (\rho_r - \rho_c) \cdot g}{\xi \cdot \rho_c}}, \quad (2.26)$$

Для ламінарного осадження швидкість осадження визначається за законом Стокса. Розкриємо коефіцієнт опору середовища для ламінарного режиму руху: Якщо число

$$\text{Re} \leq 2 \Rightarrow \xi = \frac{24}{\text{Re}}, \quad (2.27)$$

$$\text{Re} = \frac{v \cdot s}{\nu} = \frac{v \cdot s \cdot \rho_c}{\mu}, \quad (2.28)$$

де ρ_c - густина сполучного металу, кг/м³;

s - характерний розмір шару, що наплавляється, м;

$s=d$; ν – модуль характерної швидкості середовища;

μ - динамічна в'язкість середовища, Па · с;

$\nu \cdot \eta$ - кінематична в'язкість, м²/с.

На рис. 2.9 представлено схему ламінарного режиму, в якому шари не перемішуються, а паралельно переміщуються відносно один одного. І тут проявляється закон внутрішнього тертя Ньютона.

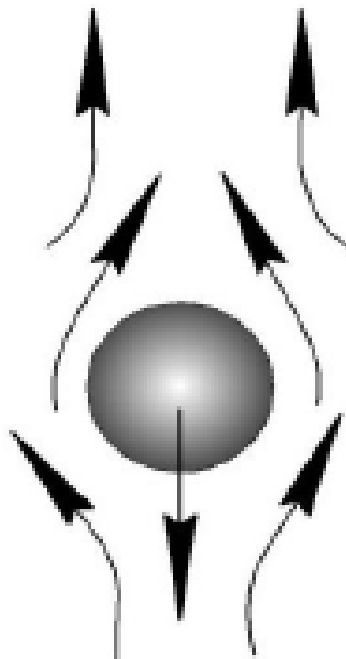


Рис. 2.9 - Рух твердого тіла у в'язкому металі.

Підставляючи отриманий вираз (2.23) у формулу (2.26) отримаємо

$$\xi = \frac{24 \cdot \mu}{v \cdot d \cdot \rho_c},$$

$$v^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{d \cdot (\rho_r - \rho_c) \cdot g \cdot v \cdot d \cdot \rho_c}{24 \cdot \rho_c \cdot \mu}, \quad (2.29)$$

Так як для даної системи всі величини, крім швидкості, є постійними, то рівняння (2.29) можна у наступному вигляді, перетворивши формулу (2.29) отримаємо формулу швидкості Стоксу:

$$v = \frac{d^2 \cdot g \cdot (\rho_r - \rho_c)}{18 \cdot \mu}, \quad (2.30)$$

У формулу (2.29) можна ввести константу Стокса

$$K = \frac{d \cdot g}{18}, \quad (2.31)$$

де d – еквівалентний діаметр частинки, мм;

g - прискорення вільного падіння, м/с²;

μ - коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па · с.

Константа Стокса характеризує швидкість наростання осаду при впливанні, що припадає на одиницю ефективної щільності дисперсної суміші. Підставляючи вираз (2.30) у формулу (2.31) отримаємо:

$$v = K \cdot \frac{(\rho_r - \rho_c)}{\mu}, \quad (2.32)$$

Формула Стоксу має обмежене застосування. Вона справедлива тільки для твердих сферичних частинок, які рухаються рівномірно з невеликою швидкістю у великому обсязі дисперсійного середовища, щоб не було взаємодії частинок один з одним.

Встановлено, що величина змінна, що залежить від температури, а температура розплаву залежить від часу, тому вводимо новий показник, званий швидкісний параметр $v \cdot \mu$, определяемый:

$$v \cdot \mu = K \cdot (\rho_r - \rho_c). \quad (2.33)$$

Проведені та описані експерименти з визначення геометричних розмірів частинок компонентів порошкової суміші, дозволили побудувати залежності руху швидкісного параметра частинок від їх розміру (рис. 2.10.) і змодельовати седиментаційний аналіз частинок, що наплаваються, що описує рух твердої сферичної частинки в наплавленому шарі.

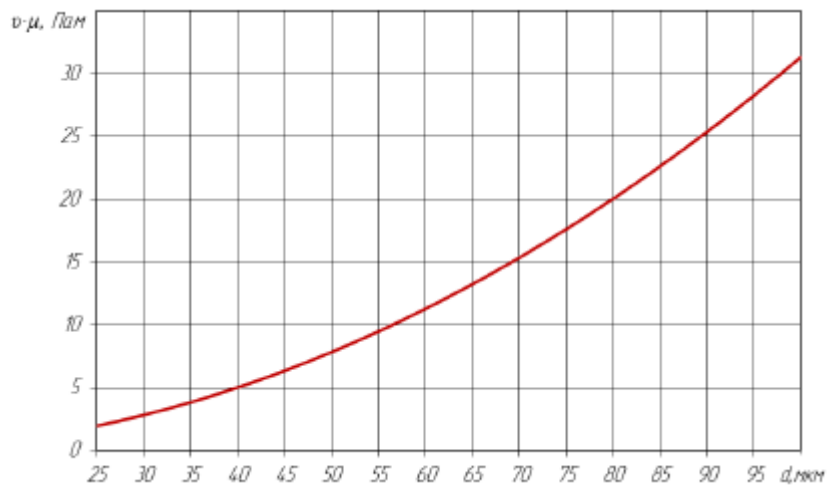


Рисунок 2.10. – Залежність швидкісного параметра частинки від діаметра.

Як видно з графіка, частинки з мінімальним діаметром, рівним 25 мкм, мають параметр швидкості спливання $2 \cdot 10^{-6}$ Па · м, частинки з середнім діаметром, рівним 50 мкм, мають швидкість спливання $8 \cdot 10^{-6}$ Па · м, у частинок з максимальним діаметром 100 мкм - швидкість вс 100 мкм - швидкість спливання $8 \cdot 10^{-6}$ Па · м;

Таким чином, чим більше діаметр частинок, тим більша у них швидкість спливання, що означає велику їх концентрацію у верхній частині наплавленого шару, і навпаки, велика концентрація дрібних частинок характерна у підставі наплавленого шару.

Таким чином, розроблена математична модель осідання наплавлених частинок при газополум'яній наплавці дозволила теоретично обґрунтувати схему руху частинок у шарі, визначити сили, що діють на частинки, а також ввести новий показник руху швидкісного параметра частинки.

2.4. Методика проведення зносних випробувань у лабораторних та польових умовах.

Більшість ґрунтообробних робочих органів вибраковується через знос їх робочих поверхонь. Тому одним із найбільш значущих показників якості відновлення є зносостійкість напавленого шару, що визначає в більшості випадків ресурс відновленого робочого органу [19]. Зносні випробування експериментальних зразків з напавленим шаром проводили на ґрунтовому лабораторному каналі для зносних випробувань.

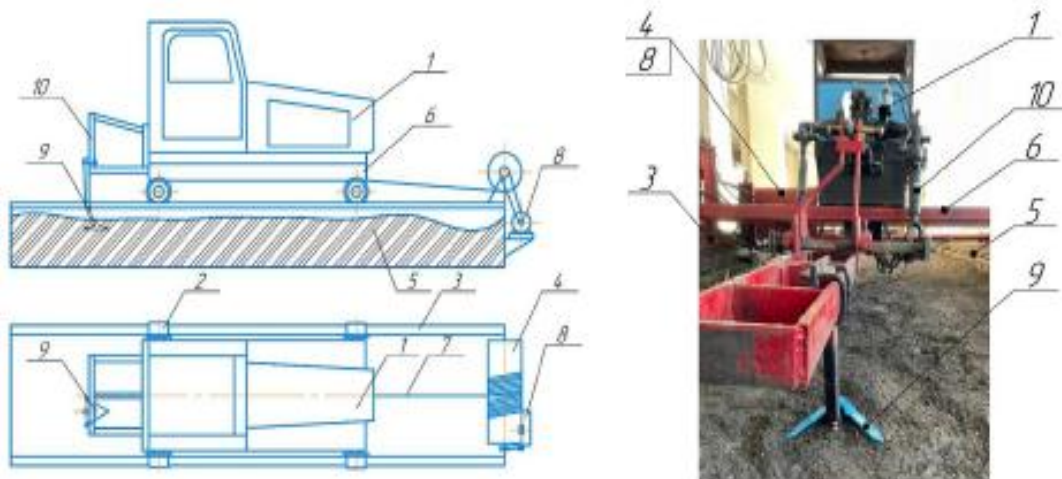


Рис. 2.11. – Схема та лабораторна установка ґрунтового каналу: 1 – комбінований візок; 2 – ролики; 3 – рейкові колії; 4 – барабан; 5 – фундамент каналу; 6 – рама системи автоматизованого переміщення; 7- трос; 8 – електродвигун; 9- робочий орган; 10 – навішування.

Запропонована методика проведення зносних випробувань полягає у наступному. У ґрунтовому каналі поміщають абразивну масу з частинок глини, піску та інших компонентів, що входять до складу ґрунту. Потім фіксують на стійку експериментальний зразок. Досліджуваний робочий орган жорстко закріплюється на пересувний візок. Шляхом переміщення досліджуваної лапи культиватора вздовж ґрунтового каналу, заглиблену на необхідну величину за допомогою системи автоматизованого переміщення (діапазон заглиблення варіюється). З метою досягнення точності вимірювань, необхідно ґрунтовий канал вирівняти та зволожити. Як експериментальний робочий орган застосували лапу посівного комплексу Bourgault 8810-35.

Для оцінки інтенсивності зношування робочої поверхні лапи культиватора піддавалася до фарбування. Для оцінки зносостійкості лапи культиватора в польових умовах приймали знос у перерізах, що найбільше піддаються зношування – леза і носіння лапи. Дана оцінка дозволяє визначити ресурс, що реалізує при проведенні дослідження зносостійкості різних елементів лап культиватора, а також діагностувати агротехнічні вимоги до якості обробітку ґрунту та зрізання бур'янів.

Порівняння серійних лап культиватора з експериментальними лапами давала можливість визначення остаточної оцінки зносу, що дорівнює граничному стану зносу носка і леза лапи. Однак лапа культиватора має змінну ширину леза, тому важко виміряти ширину леза універсальним вимірювальним інструментом. Формування вимірювальних баз у вигляді пропилів на робочій поверхні леза лапи так само ускладнює точність вимірювання через те, що не дає можливість вимірювати нормалі до леза. З урахуванням вищесказаного приймали умовну ширину, що дорівнює відстані від леза до штучної вимірювальної бази у вигляді передньої

поверхні спеціального шаблону, що прикладається на лапу зверху і притискається струбциною [18]. Згідно зі схемою, представленою на рис. 2.11, на верхню поверхню лапи культиватора прилягає шаблон, виготовлений з листового дюралюмінію. Лінійні виміри виконували за допомогою ноніусного вимірювального штангенциркуля типу ШЦ-125, а також має глибиномір з ціною поділу 0,02 мм. З торця поверхні шаблону наносили пропили, які входив щуп-глибиномір штангенциркуля [18].

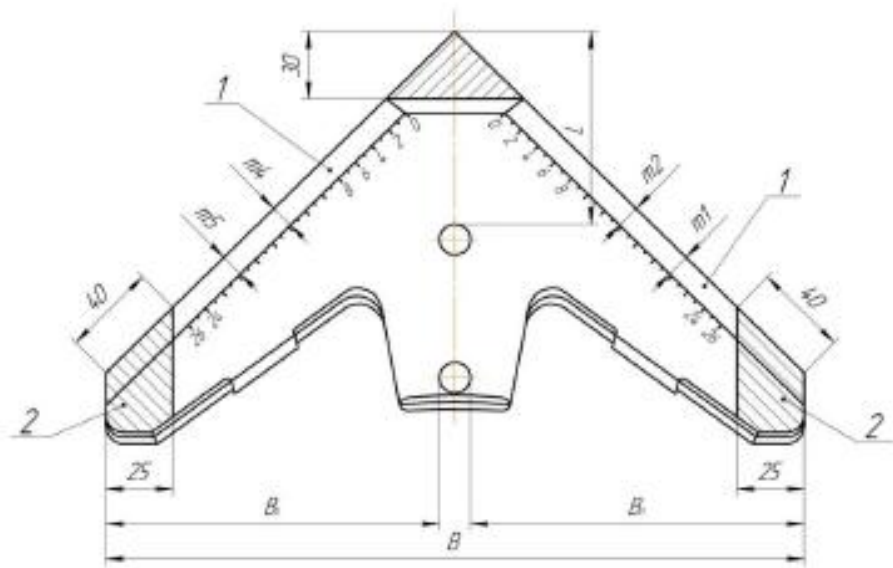


Рис. 2.12 – Зони вимірювання лінійного зносу лап [14]: 1 – зона леза, 2 – зона кінця крила.

Передбачені такі значення кутів лап: кут кришення носової частини дорівнює $26^{\circ}40'$; кут розчину дорівнює 2° кут кришення крил лапи дорівнює 28° , що забезпечує необхідне розпушування ґрунту без оборотів пласта; радіус дорівнює 230 ± 4 (мм) [16].

Щоб визначити граничний стан лапи культиватора брали до уваги наступні критерії: знос по ширині лапи, що дорівнює 50 мм, що виключає

взаємне перекриття обробленої зони першим і другим рядом лап; знос шкарпетки, що досягає 30 мм; знос леза по ширині дорівнює 15 мм; знос хвостовика, що виключає можливість встановлення кріпильних болтів; вигин, злам крил [14]. Наведені вище перші три критерії визначені шириною та видом наплавленого сплаву, за наявності якого має здійснюватися процес самозагострення [14].

При експлуатації лапи культиватора із шириною захвату 310 мм. встановлювали на передній ряд культиватора, а лапи шириною 330 мм - на задній ряд. Посівний комплекс агрегувався тракторами тягового класу 3 (1 агрегат), тяговий клас 4 (1 агрегат). Лапи, що вичерпали ресурс, замінювалися серійними [24].

2.5. Методика нанесення порошкових сумішей технологією газополум'яного наплавлення.

Однією з додаткових операцій є методика змішування порошкові компоненти. Для отримання покриття використовували металевий порошок ПГ-12Н-02 ТУ 319-19-004-96 «Порошкові наплавочні самофлюсувальні на основі нікелю», хімічний склад порошку наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Хімічний склад металевого порошку ПГ-12Н-02.

Порошковий матеріал додатково містить оксид кремнію SiO_2 (класу 10 А25 100).

Нанесення порошкових сумішей технологією газополум'яної наплавки проводилися на установці газополум'яної наплавки, що складається з (рис. 2.13): пальника наплавної моделі, пропанобутанова суміш як горючий газ і кисень [12].



Рис. 2.13. – Встановлення газополум'яного наплавлення : 1 - пальник наплавної моделі Euro Jet XS-8; 2 – каркас установки; 3 - пропанобутанова суміш; 4 – лоток.

Відповідальною частиною газополум'яної установки є інструмент – пальник наплавної моделі Euro Jet XS-8. Пальник наплавної моделі повинен відповідати таким вимогам, як жароміцність, зносостійкість і одночасно бути хорошим провідником як газового полум'я, так і порошкового матеріалу. У лабораторній установці пальник комплектується трьома видами сопел: №1, №2, №3, представлений малюнку 2.14. Параметри газів при нанесенні встановлювали наступні: пропанобутанова суміш – 0,5 бар, кисень – 2 бар.



Рис. 2.14 - Напальний пальник моделі Euro Jet XS-8.

Технічні характеристики наплавного пальника представлені у таблиці 2.2, термодинамічні характеристики газової суміші представлені у таблиці 2.4. Таблиця 2.3 Технічні характеристики пальника наплавної моделі Euro Jet XS-8.

Таблиця 2.4. Термодинамічні характеристики газових сумішей

Обґрунтований порошковий матеріал складається з компонентів у співвідношенні, мас %: порошок оксиду кремнію SiO_2 -10, сплав, що самофлюсується на основі нікелю ПГ-12Н-02 – 90. Підготовлена до наплавлення поверхню зразка прогрівали пальником до температури 550-580°C тривалістю 5с. Для діагностування процесу нагрівання пластини зразка при нанесенні порошкового матеріалу технологією газополум'яного наплавлення використовували інфрачервоний радіаційний пірометр марки АКИП 9311. Далі здійснювали подачу складів порошкових сумішей до поверхні основного металу з тривалістю 1...3 с, наносили порошкову суміш на прогріту поверхню зразка наплавальним пальником Euro Jet XS – 8.

Першим проходом наплавляли шари порошкових матеріалів у різних відсоткових співвідношеннях, другим проходом оплавляли їх полум'ям пальника на режимах (таблиця 2.5) [15]. Час повного проплавлення покриття завтовшки 1...1,5 мм становило 5...8 с [14].

Таблиця 2.5 Показники режиму нанесення порошкового матеріалу технологією газополум'яного наплавлення

Показники технологічного циклу нанесення порошкового матеріалу заміряли за допомогою встановленої програми Free Stopwatch Portable на Android. У таблиці 2.6 наведено показники технологічних циклів нанесення порошкової суміші на відновлювану та зміцнену поверхню лапи культиватора.

Таблиця 2.6. Показники технологічного циклу наплавлення порошкової суміші на поверхню робочого органу

3. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОШУВАННЯ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ЛАПИ КУЛЬТИВАТОРА,

3.1. Результати зносних випробувань лап у польових умовах.

Як експериментальний робочий орган застосували лапу посівного комплексу Bourgault 8810-35. Після кожного проходу робочого органу із шістьма повторностями на ґрунтовому каналі спостерігали, що площа забарвленої поверхні інтенсивно зношується, тобто. забарвлена поверхня робочого органу зрізається. Результати вимірів та фотографії пофарбованої поверхні наведено на малюнку 3.1.

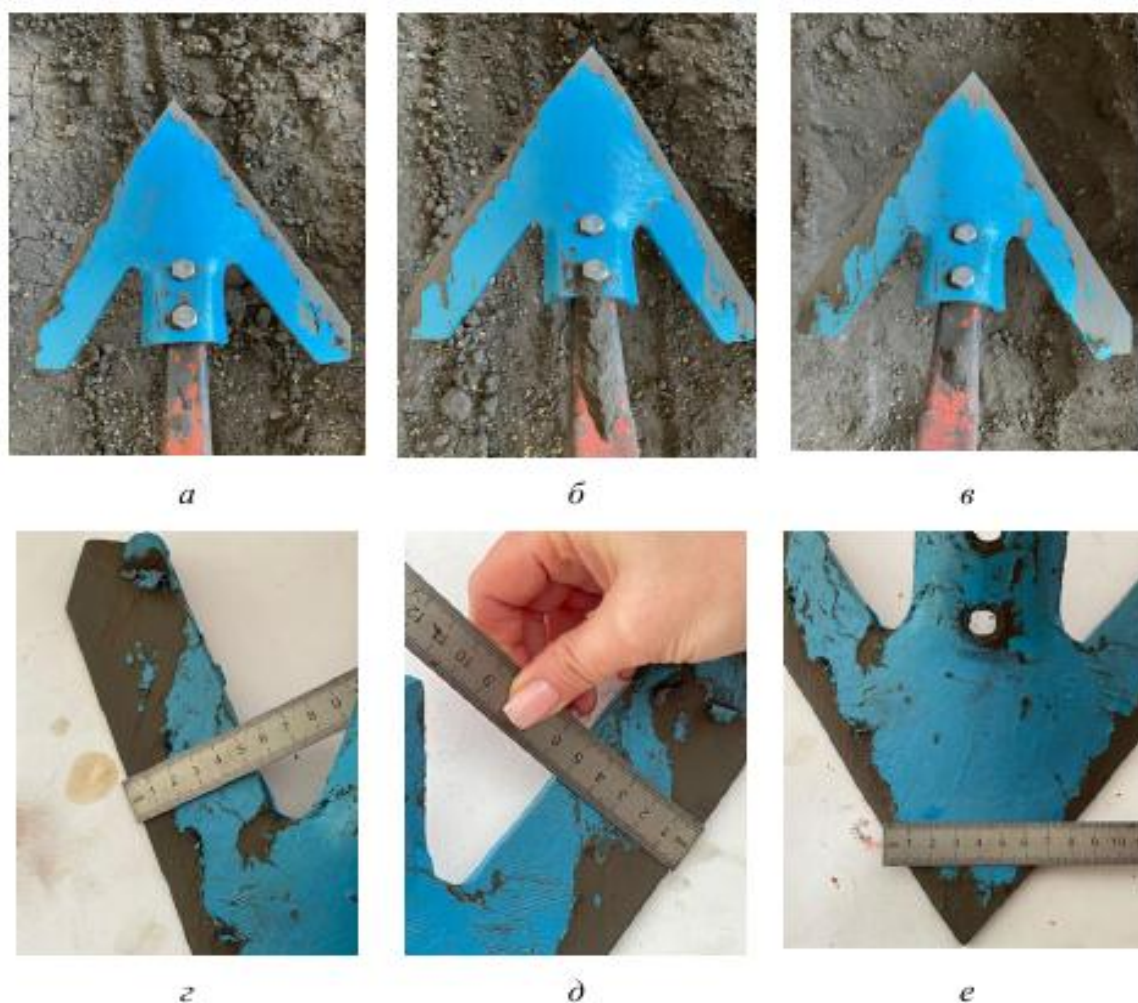


Рис. 3. 1 – Результати лабораторних зносних випробувань: а – робочий орган після першого проходу; б – робочий орган після третього проходу; в – робочий орган після шостого проходу; г, д, е – виміри пофарбованих крил та носової частини робочого органу.

З рис. видно, що робочі кромки лапи культиватора мають знос лез, шкарпетки та хвостовика. З графіка (рис. 3.2) видно, що тиск ґрунту на робочий орган збільшується.

Відповідно відбувається інтенсивне зношування робочих поверхонь лапи культиватора.

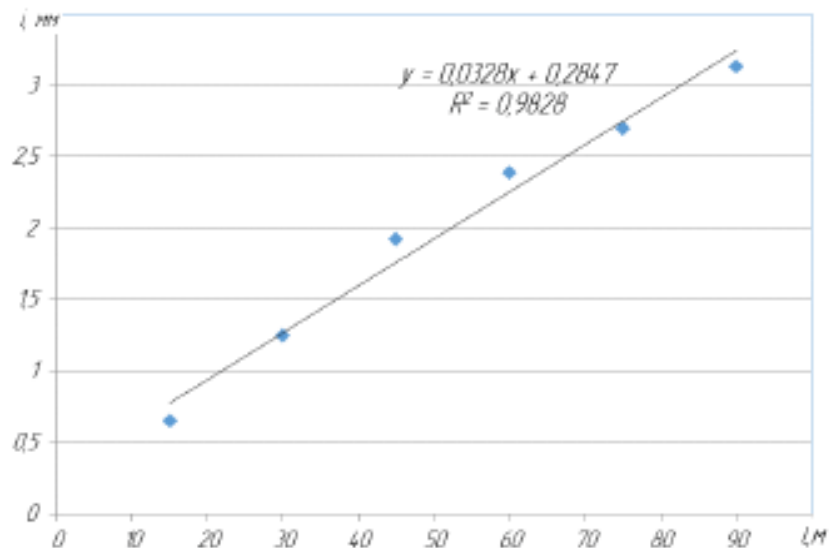


Рис. 3.2 - Інтенсивність зношування лапи культиватора в залежності від пройденого шляху.

Результати зносних лабораторних зносних випробувань робочого органу ґрунтообробних машин показали, що найбільше значення тиску ґрунтового середовища на поверхню лапи культиватора спостерігається в зонах носової, переходу лапи до хвостовика, та леза робочого органу. Зіставивши лапи культиваторів представлених на рис. 3.3, можна сказати, моделі зносу лап культиваторів отримані експериментальними та змодельованими методами доводять, що лапа має однаковий знос.

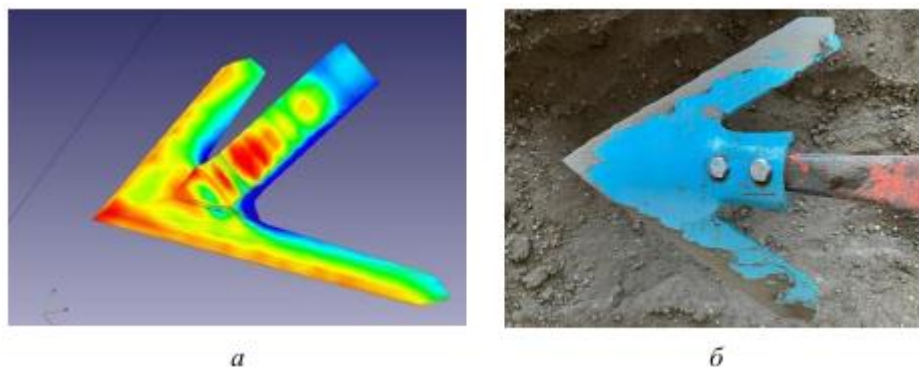


Рис. 3.3 – Робочі органи ґрунтообробних машин: а – лапа культиватора експериментальна; б – математична модель лапи культиватора.

За результатами досліджень визначили характер та інтенсивність зношування робочих поверхонь лапи культиватора (рисунок 3.4).

Таблиця 3.1 - Динаміка зносу лез лапи культиватора.

Образцы лап	Наработка, N, га									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Серийная	0,108	0,549	0,896	1,428	2,102	2,634	3,134	3,969	4,847	5,974
Экспериментальная	0,096	0,504	0,719	1,063	1,375	1,776	2,192	2,869	3,542	4,559

Таблиця 3.2 - Динаміка зносу носка лапи культиватора

На рис. 3.4 представлені залежності зносу леза лапи культиватора від напрацювання, але в малюнку 3.5 - залежності зносу носка лапи культиватора від напрацювання.

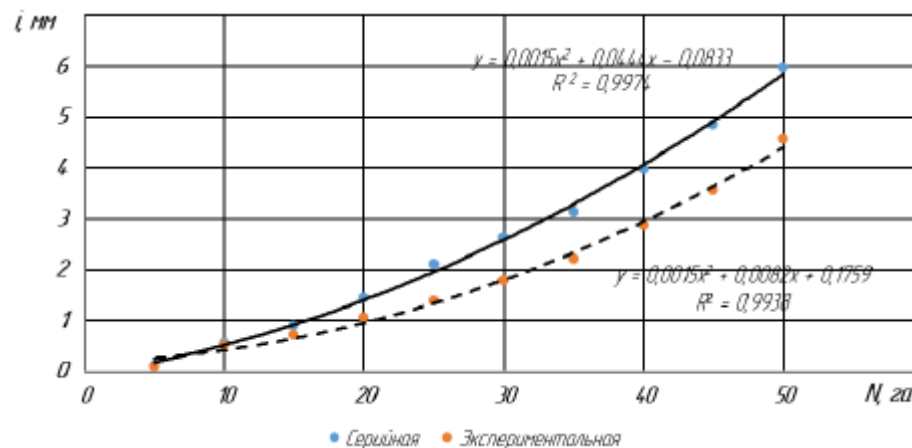


Рис. 3.4- Графіки залежностей зносу леза лапи культиватора від напрацювання.

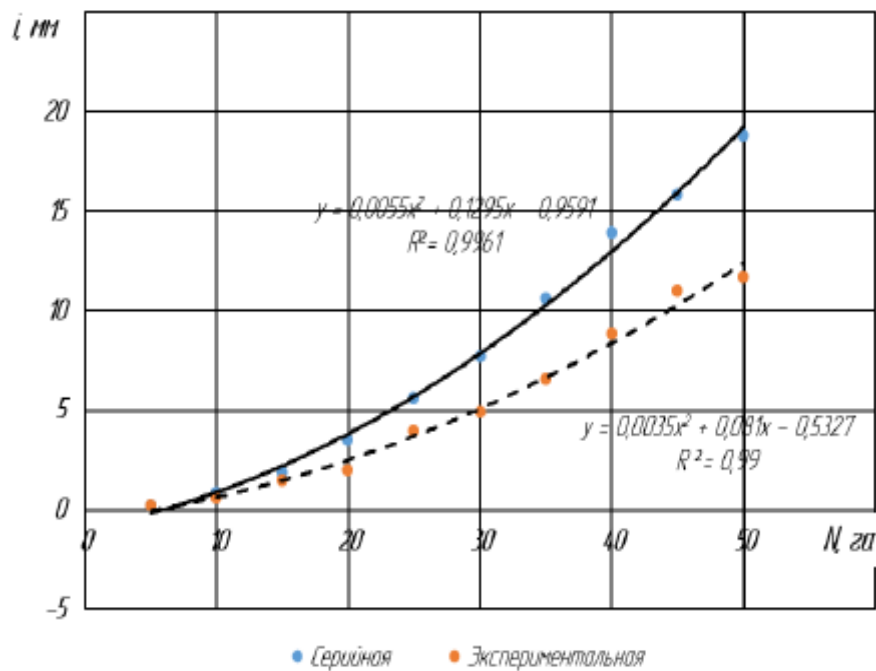


Рис. 3.5 – Графіки залежностей зносу носка лапи культиватора від напрацювання.

З графіків представлених на малюнках 3.4-3.5 видно, при збільшенні напрацювання робочого органу збільшується знос леза лапи та носіння за квадратичними залежностями. Для динаміки зношування леза серійної лапи отримано наступні залежності

$$i = 0.0015N^2 + 0.0444N - 0.0833, \quad (3.1)$$

а для експериментальних

$$i = 0.0015N^2 + 0.0082N + 0.1759. \quad (3.2)$$

Для динаміки зносу носка серійної лапи отримано наступні залежності

$$i = 0.0055N^2 + 0.129N - 0.9591, \quad (3.3)$$

а для експериментальних

$$i = 0.0035N^2 + 0.0081N + 0.5327. \quad (3.4)$$

За отриманими формулами (3.1 – 3.4) проведено прогнозування динаміки зносу та побудовано графіки (рисунок 3.6-3.7) прогнозування граничного стану, які дозволяють оцінити втрату працездатності лапи за граничним зносом. На рис. 3.6 представлені залежності прогнозування зносу леза, а на рис. 3.7 зносу носіння експериментальних та серійних лап.

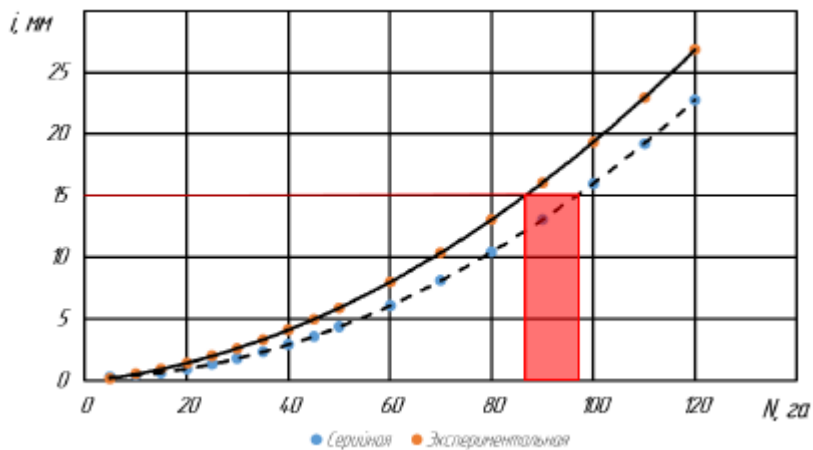


Рис. 3.6 -Залежність прогнозування граничного стану при зношенні леза лапи культиватора від напрацювання.

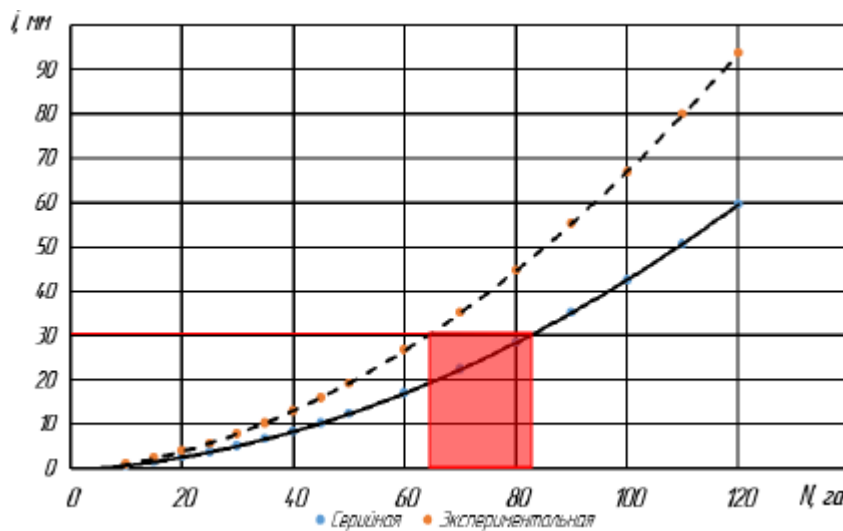


Рис. 3. 7 -Залежність прогнозування граничного стану при зношенні носка лапи культиватора від напрацювання.

З даних графіка (рис. 3.6 -3.7) можна прогнозувати напрацювання, при яких лапа культиватора втратить свою працездатність по зносу леза і носіння. Експериментальна лапа культиватора при граничному зносі 15 мм досягне

свого граничного стану і втратить свою працездатність при напрацюванні 97 га, а серійна лапа 83 га. Напрацювання експериментальної лапи вище 14 га проти серійної, що від 16,9 %. Графік 3.7 показує, що експериментальна лапа культиватора при граничному зносі 30 мм шкарпетки досягне свого граничного стану і втратить свою працездатність при напрацюванні 83 га, а серійна лапа при 65 га. Напрацювання експериментальної лапи вище на 18 га проти серійної, що від 27,7 %. Експериментальні та серійні лапи втратять свою працездатність насамперед за рахунок зносу шкарпетки лапи – експериментальна лапа при 83 га, а серійна 65 га. Таким чином, польові зносні випробування показали підвищення працездатності робочих органів ґрунтообробних машин, відновлених та зміцнених пропонованою технологією.

3.2. Результати досліджень якості наплавлених шарів.

При газополум'яній наплавці порошкову суміш при русі у високотемпературному потоці пропанобутанової суміші, що витікає з великою швидкістю з пальника, наплавляються на поверхню основного матеріалу без зміни форми. Температура полум'я горючих газів у суміші киснем – 2000...3000°C, у суміші із повітрям – 500...900°C. Зчеплюваність між наплавленими частинками і поверхня основного металу відбувається за рахунок зіткнення частинок, що наплавляються, з поверхнею основи. Це можливо тільки за певних швидкостей і температури крапель і частинок. Швидкість частинок при газополум'яному наплавленні порошкової суміші на відстані 100 мм від зрізу сопла пальника становить 20, 35 і 50 м/с відповідно. Частинки порошкової суміші мають різні розміри: чим частинки дрібніші, тим вони легше розганяються пропанобутановим струменем, а при зниженні швидкості струменя частки різко знижують свою швидкість

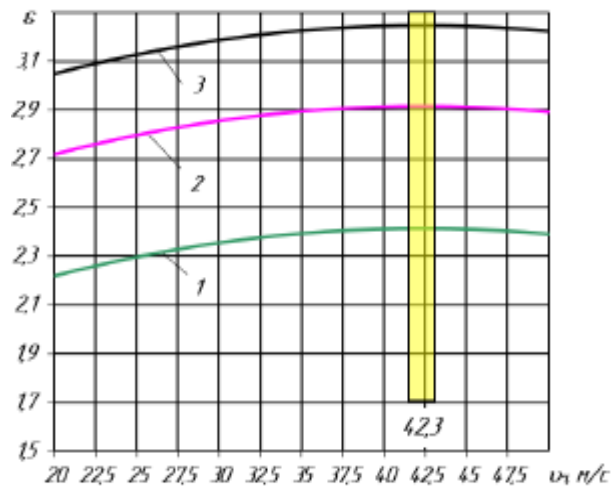


Рис. 3.8. – Вплив швидкості частинок на зносостійкість наплавленого шару за оптимальних значень t_c ; P_x ; T_p і v_n , що дорівнює: 1 - 400 м/с, 2 - 600 м/с, 3 - 800 м/с.

Графік свідчить, що швидкість частинок v_n впливає на зносостійкість ϵ , має екстремум при всіх температурах T_p (400; 600; 800 °C), причому зі збільшенням температури T_p зносостійкість вища. Екстремум досягається при значенні швидкості частинок, що дорівнює 42,3 м/с. У технології газополум'яної наплавки газовий струмінь виконує функції, пов'язані з нагріванням частинок, прогрівом поверхні шару, що наплавляється, розпиленням розплавленого матеріалу. В усіх випадках ці функції визначаються швидкістю газового потоку. Встановлено, що при нагріванні високотемпературним газовим струменем відбувається витрата газової суміші. Витрата газової суміші визначає швидкість газового потоку і, відповідно, його ефективність при розпиленні та перенесенні частинок порошкової суміші. Встановлено, що зі збільшенням витрати зростає швидкість частинок, що наплавляються. При великих витратах газу, що розпилює, зменшується температура наплавлюваних частинок при їх переносі, а їх швидкість може перевищити допустимі значення. На рис. 3.9

представлені графіки впливу витрати газової суміші на зносостійкість наплавленого шару.

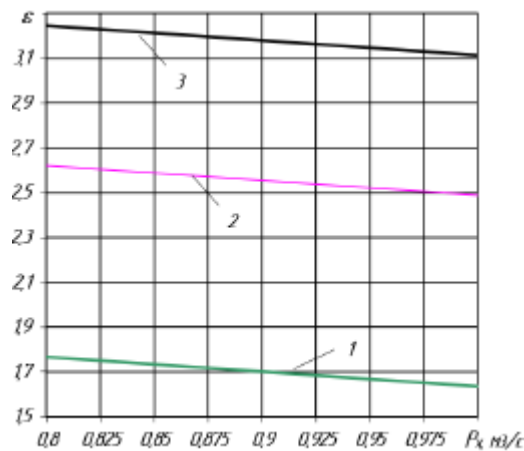


Рис. 3.9 – Вплив витрати кисню на зносостійкість наплавленого шару за оптимальних значень T_p ; t_c ; u_c і T_n , що дорівнює: 1 – 800 °С, 2 – 400 °С, 3 – 1200 °С.

З графіка видно, що зі збільшенням витрати кисню P_x зносостійкість знижується у всьому діапазоні зміни температури T_n від 800 до 1200 °С. Причому більша зносостійкість досягається при максимальному значенні T_n . Подальший рух у бік поліпшення ϵ для пошуку стаціонарної області неможливо, оскільки, як зазначалося раніше у розділі 3, такі параметри мають граничні значення: $T_p = 800$ °С; $t_c = 8$; $P_x = 0,8$ м³/год; $T_n = 1200$ °С.

Таким чином, аналіз наведених графіків на рисунках 4.29 – 4.33 показує, що найбільшою мірою на зносостійкість ущільненого шару лапи культиватора впливають величина температури плавлення порошку, температура поверхні підкладки. Швидкість подачі часток надає слабкий вплив на зносостійкість, але при $v = 42,3$ м/с досягається оптимум ϵ . Розглянуті параметри режиму газополум'яної наплавки – час наплавлення і витрата кисню хоча статистично значущі, але мало впливають на зносостійкість ϵ .

3.3. Розробка технології газополум'яного наплавлення.

Як об'єкт для відновлення та зміцнення нам були надані лапи культиватора як масово використовуваний робочий орган, для якого вирішення проблеми підвищення якості наплавленого шару робочих органів ґрунтообробних машин на основі вдосконалення технології їх відновлення та зміцнення.

На підставі проведених досліджень розроблено технологічний процес відновлення та зміцнення порошкової суміші робочих поверхонь лапи культиватора з використанням технології газополум'яної наплавки.

Структурна схема представлена рис. 3.10, технологічний процес у таблиці 3.3.

Рис. 3.10 - Схема технологічного процесу відновлення та зміцнення лап культиваторів.

На етапі дефектації лапи культиваторів перевіряли на відсутність дефектів виготовлення (затуплення, тріщин та сколів металу на лезі) за допомогою лупи переглядової ЛП-1-10х згідно з нормативним документом ГОСТ 257016-93. Придатні деталі прямували на подальше відновлення та зміцнення, а непридатні до брухту. Порошкова суміш перед її застосуванням піддавалася змішуванню. Підготовка обладнання для наплавлення здійснювалася відповідно до ГОСТ 12.3.036-94.



a



б



в

Рис. 3.11.-Наплавка порошкових матеріалів на зразки лап культиваторів технологією газополум'яної наплавки: а – лапи культиваторів до напавлення; б -технологія нанесення порошкових матеріалів; в-лапи культиваторів після напавлення.

Після напавлення зовнішній вигляд покриття деталей контролювався візуально за допомогою лупи переглядової ЛП-1-10х за ГОСТ 257016-83. Не допускалася наявність частинок нерозплавленого металу, тріщин, відшарування, здуття, слідів місцевої корозії згідно з ГОСТ 9.304-87. Товщина покриття контролювалася за допомогою магнітного товщиноміра ТТ 260 з відносною похибкою вимірювання $\pm 10\%$ згідно з ГОСТ 27750-88 не менше ніж у 10 місцях згідно з ГОСТ 9.304-87 та ГОСТ 27750-88. Контроль якості з'єднання покриття з основою по периферії та торцям лап культиваторів проводився методом капілярної дефектоскопії за ГОСТ 18442-80 та ультразвукового контролю за ГОСТ 14782-96. При отриманні незадовільних результатів контролю та випробувань проводили повторні контроль та випробування. Результати повторних випробувань були остаточними та поширювалися на всю партію.

Таблиця 3.3 - Технологічний процес відновлення та зміцнення лап культиваторів.

Таким чином, розроблена технологія газополум'яного наплавлення дозволяє підвищити якість наплавленого шару робочих органів ґрунтообробних машин на основі вдосконалення технології їх відновлення та зміцнення.

ВИСНОВКИ

1. Зношування лапового робочого органу збільшується в середині лапи, потім поступово зменшується і підвищується ближче до леза. На зношування впливає швидкість руху лапи культиватора - при збільшенні швидкості з 1,7 м/с до 3,7 м/с (у 2,2 рази) тиск підвищується в 2,8 рази з 1225,5 до 3455,3 Па. За зносними дослідженнями культиваторних лап визначено основні ділянки інтенсивного зношування робочої поверхні – лезо, носок та хвостовик лапи культиватора.
2. Введення до складу порошкової суміші оксиду кремнію SiO_2 для нанесення зносостійкого покриття призводить до суттєвого підвищення зносостійкості одержуваного покриття.
Підбір режимів газополум'яного наплавлення дозволив отримати зносостійкий зміцнювальний шар завтовшки 0,4 мм. 0,6мм.
3. Обґрунтовано технологію відновлення та зміцнення робочих органів газополум'яним наплавленням. Технологія дозволяє підвищити якість наплавленого шару, що характеризує високою адгезією та зносостійкістю, що дозволяє підвищити ресурс робочих органів ґрунтообробних машин на 27,7 %.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аксьонов, П.І. Машини для обробітку ґрунту. Київ. .Техніка, 2005. - 268 с.
2. Балан В.П. Точкове зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин / В.П. Балан, В.М. Ключенко, В.І. Олісенко // Механізація та електрифікація сільського господарства. – 1991. – № 2. – с. 44-45.
- 3.. Балдаєв Л. Х. Газотермічне напилення. : Київ.: Знання. 2007. - с. 344
4. Бетень Г.Ф. Відновлення та зміцнення ґрунторізальних елементів дифузійним наморозуванням зносостійкими сплавами. Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2003. 188 с.
5. Борисов Ю.С. Газотермічні покриття із порошкових матеріалів: довідник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов та ін. - Київ: Наукова Думка, 1997. - 544 с.
6. Бурак П.І. Порівняльні випробування сільськогосподарської техніки. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А 2013. 416 с.
7. Василенко Н.А. Перспективи застосування локального зміцнення під час виготовлення та відновлення робочих органів // Техніка АПК. 2008. Вип. 1. с. 29-31.
8. Василенко В.В. Культиватори (Конструкція, теорія та розрахунок) / В.В. Василенко, П.Т. Бабин. – Київ: УАСГН, 1991. – 187 с.
9. Федорченко І.М. Порошкова металургія Матеріали, технологія, властивості, сфери застосування. Довідник/За ред. І.М. Федорченко. Київ: Наукова думка, 1985. – 745 с.
10. Хасу А. Наплавлення та напилення пров. з яп. /А. Хасу, О. Морігакі; пров. з яп. В.М.Попова; за ред. Ст. З. Степіна, Краматорськ : ДДМА 1995. - 240 с.

11. Хрущов, М.М. Абразивне зношування. Київ, Центр навчальної літератури 1999. - 252 с.
12. Чорноіванів, В.І. Організація та технологія відновлення деталей машин Новий Світ . Львів. 2016. – 568 с.
13. Халанський В.М. Сільськогосподарські машини. Львів: Афіша. 2003. - 624 с.
14. Вільямс Ф. А. Теорія горіння. Київ: Логос, 2001. - 615 с.
15. Виноградов В.М. Абразивне зношування. Львів: Афіша. 2000. 253 с.
16. Дорожкін Н.М., Гімельфарб В.М. Відновлення деталей сільськогосподарських машин. Київ: «Агроосвіта» . 1998. 140 с.
17. Йофінов С.А. Експлуатація машинно-тракторного парку. /С.А.Йофінов, Г.П. Лишко., Київ «Агроосвіта» 1994. 340 с.
18. Карпенко, О. н. Сільськогосподарські машини. Київ: Каравела. 1999. 527 с.
19. Клочков А. Ст. Сільськогосподарські машини. К.: Знання-Прес., 1997. - 494 с.
20. Журавель Д.П., Паламарчук І.П., Уминський С.М., Паламарчук В.І. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: Підручник для здобувачів вищої освіти. Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2021. 448 с.
21. Коробов Ю.С., Бороненков В.М. Основи дугової металізації. Фізико-хімічні закономірності. Львів: Афіша, 2012. 342с.
22. Кленін Н.І. . Сільськогосподарські машини. Київ: Фірма «Інкос», 2008 – 816 с.
23. Кукін П. П. Теорія горіння та вибуху: Київ : Слово,, 2012. - 435 с.
24. Кушнар'ов А. С., Кочов Ст. І. Механіко-технологічні основи обробітку ґрунту. Київ: Урожай, 1989. 144 с.
25. Марочник сталей та сплавів: довідник. за заг. ред.А. З. Зубченко. Львів: Афіша, 2003. 784 с.

26. Новіков, В.С. Зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин Київ: «Либідь», 2013. 112 с.
27. С.М. Уминський, Б.В. Лебедев, П.І. Осадчук. Технологія конструкційних матеріалів . (Навчальний посібник для студентів вищих учбових закладів), Одеса: Видавництво та друкарня «ТЕС», 2018 р.178с.
- 28.Кравчук В.С., Дашенко О.Ф., Коломієць Л.В., Лимаренко О.М. Основи опору матеріалів. Навчальний посібник. Одеса : Стандарт,2019, 322с.
29. Овчинніков В.В. Технологія газового зварювання та різання металів: Київ.: Логос,2016. - 240с.
30. Попов І.М. Перспективи та розвиток конструкцій ґрунтообробних машин та знарядь / І.М. Попов // Механізація та електрифікація сільського господарства. – 1987. – № 3. – С. 13-1
31. Севернєв М.М. Знос та корозія сільськогосподарських машин, . Вінниця : ВНТУ, 2011. 333 с.
32. Семчук Г.І. Аналіз способів підвищення довговічності культиваторних лап/Г.І. Семчук, О.О. Дудников // Східноєвропейський журнал передових технологій. 2003. 5/1(65) с. 67-71.
33. Сидоров С.А. Підвищення ресурсу ґрунторізальних органів наплавочними сплавами. С.А. Сидоров, А.І. Сидоров // Механізація та електрифікація сільського господарства. 2003. №9. с. 20-22.
34. Тененбаум М. М. Опір абразивного зношування. Київ: Знання, 1996. 270 с.
35. Ткачов, В.М. Працездатність деталей машин в умовах абразивного зношування. Львів: НУЛП , 1995. - 336 с.
36. Bagautdinova, I. Improving the durability of cultivator blades using one-sided gas-flame surfacing. / Fayurshin A., Farkhshatov M., Saifullin R., Islamov L., Gaskarov I., Masyagutov R.// Journal of Applied Engineering Science. 2021. Т. 37. № 1. С. 57-67.

38. Bagautdinova I.I. Cylindrical interfaces repair technique using electric resistance welding of metal powder materials / Gaskarov I.R., Farkhshatov M.N., Saifullin R.N., Fayurshin A.F., Pavlov A.P. // Results in Engineering. 2022. T. 16. C. 100699.
39. Chaliampalias D. Comparative examination of the microstructure and high temperature oxidation performance of Ni-Cr-B-Si flame sprayed and pack cementation coatings / D. Chaliampalias // Applied Surface Science. 2009. V. 255. P. 3605–3612.
40. Hemmati I. Effects of the alloy composition on phase constitution and properties of laser deposited Ni–Cr–B–Si coatings / I. Hemmati, V. Ocelik, J. Th. M. De Hosson // Physics Procedia. 2013. V. 41. P. 302–311.
41. Yonghui Chen. Microstructure and Properties of Ni-Cr-B-Si metal matrix composite coatings by laser processing / Yonghui Chen, Xiaogang Wang, Q. Han // Materials Science. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019