

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра агроінженерії і технічного сервісу

Допущений до захисту:  
завідувач кафедри

\_\_\_\_\_

(Підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

“    ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ  
ПОКРИТТІВ ДУГОВОЮ МЕТАЛІЗАЦІЄЮ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ  
РЕСУРСУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН**

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»  
за спеціальністю 208 Агроінженерія

Виконав: студент заочної форми  
навчання

Гончарук Юрій Вікторович

Керівник: к.т.н., доц.

Паладійчук Юрій Богданович

\_\_\_\_\_

Вінниця 2020



## Зміст

Анотація	5	
Вступ	7	
Розділ 1	СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
	1.1 Знос робочих органів ґрунтообробних машин	9
	1.2. Матеріали і методи підвищення зносостійкості	16
Розділ 2	ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ТЕМАТИКИ	23
	2.1 Формування властивостей покриттів при дуговій металізації	23
	2.2. Залежність властивостей покриттів від системи легування матеріалу	28
	2.3 Модель надходження кисню в порошковий метал при дуговій металізації	35
Розділ 3	ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ І ВИПРОБУВАНЬ	39
	3.1 Програма експериментальних досліджень	39
	3.2 Устаткування і матеріали для нанесення покриттів	39
	3.3 Оптимізація параметрів процесу напилення методом планування експерименту	43
	3.4. Методика експериментальних досліджень	47
	3.5 Методика експлуатаційних досліджень	49
Розділ 4	АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ І ВИПРОБУВАНЬ	53
	4.1 Результати моделювання окислення частинок при дуговій металізації	53
	4.2 Результати оптимізації режимів дугового металізації	56
	4.3 Результати експериментальних досліджень	59
	4.4 Результати експлуатаційних досліджень	64
Розділ 5	ТЕХНІКО ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	68

5.1 Розрахунок собівартості зміцнення робочого органу	68
5.2 Оцінка економічної ефективності технології	72
Висновки	74
Список використаних джерел	75
Додатки	79

## Анотація

Магістерська робота містить 83 сторінок машинописного тексту та 8 листів презентаційного матеріалу. Текст записки включає в себе вступ, п'ять розділів, висновки та список літературних джерел, в тому числі 17 таблиць і 19 рисунків, використано 70 формул. Список використаних джерел містить 32 першоджерела.

В роботі розглядається проблема підвищення працездатності сільськогосподарської техніки. В Україні іноземна техніка експлуатується на грані своїх можливостей, а щорічне напрацювання на трактор може скласти 10-15, а подекуди і 20 тис. мотогодин, разом з тракторами інтенсивному зносу піддаються і різного роду сільськогосподарські агрегати, зазвичай це машини для обробки ґрунту. Використання сучасних тракторів з збільшеною масою машин і більшими робочими швидкостями викликає більш інтенсивне ущільнення ґрунту, також цьому сприяють і складні погодні умови, це в свою чергу викликає збільшення навантаження на робочі органи ґрунтообробних машин. Використання енергонасичених тракторів у час оранки та культивуації призвело до недостатньої зносостійкості робочих органів.

У зв'язку з вищевикладеним актуальним завданням є проведення робіт по зміцненню робочих органів ґрунтообробних машин в мінімальні терміни і за прийнятною вартістю. Виконання цих вимог можливо при напиленні зносостійких покриттів з легованих порошкових дротів за допомогою продуктивного обладнання дугової металізації.

Ключові слова: ґрунтообробна техніка, технічне обслуговування, обробіток ґрунту, металізація, наплавка, порошковий дріт, дугова металізація, напилення.

## Summary

The master's thesis contains 83 pages of typewritten text and 8 sheets of presentation material. The text of the note includes an introduction, five chapters, conclusions and a list of references, including 17 tables and 19 figures, using 70 formulas. The list of used sources contains 32 primary sources.

The paper considers the problem of improving the efficiency of agricultural machinery. In Ukraine, foreign machinery is operated at the limit of its capabilities, and the annual operating time of the tractor can be 10-15, and sometimes 20 thousand hours, along with tractors are subject to intensive wear and various agricultural units, usually tillage machines. The use of modern tractors with increased machine weight and higher working speeds causes more intensive soil compaction, and this is also facilitated by difficult weather conditions, which in turn causes an increase in the load on the working bodies of tillage machines. The use of energy-intensive tractors during plowing and cultivation has led to insufficient wear resistance of the working bodies.

In connection with the above, the urgent task is to carry out work to strengthen the working bodies of tillage machines in the shortest possible time and at an affordable cost. These requirements can be met by spraying wear-resistant coatings of alloy flux-cored wires using productive arc metallization equipment.

Key words: tillage equipment, maintenance, tillage, metallization, surfacing, flux - cored wire, arc metallization, spraying.

## Вступ

У сільськогосподарському виробництві України використовують більш 33,14 млн га ріллі [1]. Для підтримки працездатності сільськогосподарської техніки щорічно випускається значна кількість запасних частин. Річна потреба сільського господарства України в робочих органах до плугів та інших ґрунтообробних машин доволі значна і не піддається численній оцінці. За період 2017 року в Україні був пік продажу тракторів та сільськогосподарських машин іноземного виробництва в загальному було продано понад 20000 одиниць техніки з яких 3560 одиниць тракторів та комбайнів, в наступні два роки ринок впав на 40%, в цей же час спостерігався ріст продажів і вітчизняної техніки завдяки запровадженій урядом лізингової програмі купівлі вітчизняної техніки.

В Україні іноземна техніка експлуатується на грані своїх можливостей, а щорічне напрацювання на трактор може скласти 10-15, а подекуди і 20 тис. мотогодин, разом з тракторами інтенсивному зносу піддаються і різного роду сільськогосподарські агрегати, зазвичай це машини для обробітку ґрунту [2-5]. Використання сучасних тракторів з збільшеною масою машин і більшими робочими швидкостями викликає більш інтенсивне ущільнення ґрунту, також цьому сприяють і складні погодні умови, це в свою чергу викликає збільшення навантаження на робочі органи ґрунтообробних машин. Використання енергонасичених тракторів у час оранки та культивації призвело до недостатньої зносостійкості робочих органів.

У зв'язку з вищевикладеним актуальним завданням є проведення робіт по зміцненню робочих органів ґрунтообробних машин в мінімальні терміни і за прийнятною вартістю. Виконання цих вимог можливо при напиленні зносостійких покриттів з легованих порошкових дротів (ПД) за допомогою продуктивного обладнання дугової металізації (ДМ).

Ступінь розкриття теми дослідження. Дослідженням процесів, закономірностей і явищ при терті і зношуванні займалися вітчизняні та

зарубіжні вчені: Непочатенко А.В.; Попова В.С.; Сігова В.І.; Руденко П.В.; К.Т. Ramesha; та ін [5-8]. Шляхом нанесення зносостійких покриттів методами газотермічного напилення їх роботи значною мірою сприяли впровадженню технології газотермічного напилення для зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин. Однак в їх дослідженнях не достатньо розкрито вплив складу напилюваних матеріалів і режимів їх нанесення на процес при напиленні окисленні покриттів, що визначає їх фізико-механічні і експлуатаційні властивості, зокрема стійкість до ударно-абразивного зносу, характерного для умов роботи робочих органів ґрунтообробних машин.

*Мета роботи.* Підвищення ресурсу робочих органів ґрунтообробних машин на основі вдосконалення технології дугової металізації зносостійких покриттів з економно легованих порошкових дротів.

*Завдання досліджень:*

1. Визначити оптимальний склад порошкового дроту і режими дугової металізації зносостійких покриттів.
2. Дослідити залежність фізико-механічних і експлуатаційних властивостей покриттів від складу порошкового дроту і режимів дугової металізації.
3. Розробити технологічний процес зміцнення розпушуючих лап культиватора стерньового важкого і визначити його економічну ефективність.

*Об'єкт досліджень.* Металізаційні покриття на робочих поверхнях лап культиватора стерньового важкого.

*Предмет досліджень.* Закономірності фізико-механічних і експлуатаційних властивостей покриттів від складу порошкового дроту і режимів дугової металізації.

*Методологія і методи досліджень.* У теоретичних дослідженнях використані методи математичного моделювання і планування експерименту в середовищі MatchLab. Експериментальні дослідження виконані за стандартними методиками, на сертифікованому обладнанні.



# 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Знос робочих органів ґрунтообробних машин

При відвальній обробці ґрунту (оранка, культивація) енергоємність процесу різко зростає через затуплення робочих органів внаслідок абразивного зносу [5].

Для багатьох видів контактної взаємодії при зовнішньому терті абразивне зношування є основним. Абразивне зношування присутнє при роботі сполучень робочих органів не тільки сільськогосподарських, але і інших машин. Абразивний знос є головним чинником, що обмежує технічні характеристики і ресурс машин, механізмів і обладнання [6].

На частку цього виду зносу доводиться від 50 до 80% випадків відмов робочих органів машин, зокрема будівельних, дорожніх, транспортних, сільськогосподарських, машин для тваринництва і кормовиробництва [5].

При виготовленні робочих органів ґрунтообробних машин (лемешів плугів, культиваторних лап, дисків борін) повинні пред'являтися підвищені вимоги до матеріалу, методів підвищення зносостійкості, технології виготовлення [6-7].

За даними робіт [6-7], найбільш зносостійкими є робочі органи зарубіжного виробництва, які мають твердість в межах HRC 50-60. Вітчизняні виробники поки не можуть забезпечити таку твердість. Необхідно звернути увагу на зміцнюючі технології при відновленні зношених робочих органів ґрунтообробних машин.

Дослідженням процесів, закономірностей і явищ при терті і зношуванні займалися вітчизняні та зарубіжні вчені Непочатенко А.В.; Попова В.С.; Сігова В.І.; Руденко П.В.; К.Т. Ramesha; та ін [5-8].

У їх роботах відзначається, що абразивний знос, для робочих органів сільськогосподарських машин є основним, при ньому присутнє багаторазове пластичне деформування одних і тих же мікрооб'ємів металу, яке викликає

відділення частинок з поверхні. Під терміном «абразивний знос» [9] розуміється руйнування поверхні тертя під впливом твердих частинок, що дряпають або ріжучуть метал. В роботі

Процес абразивного зношування розділений на чотири основні види:

- руйнування матеріалу різанням;
- руйнування матеріалу шляхом відриву (крихке руйнування);
- руйнування матеріалу при багаторазовому деформуванні мікрооб'ємів поверхневого шару (утомлююче руйнування);
- полідеформаційний процес руйнування матеріалів (спільний прояв трьох вищезазначених руйнувань, включаючи руйнування в результаті перенаклепування).

На абразивне зношування робочих органів ґрунтообробних машин впливають вологість, механічна структура ґрунту, швидкість відносного переміщення та ін. [5, 9-13].

Зважаючи на складність процесів, що протікають в поверхневому шарі металу при зношуванні, відмінності умов і режимів роботи пар тертя на рисунку 1.1 представлені орієнтовні класифікаційні ознаки всього різноманіття процесів зношування.

Силові поля, що діють на деталі машин, не тільки знижують їх механічні та експлуатаційні властивості, а й змінюють геометричні параметри через зношування [9].

Для вибору технологічного процесу відновлення і зміцнення зношених поверхонь робочих органів необхідно знати не тільки кількісні характеристики зносу, але і їх природу і класифікацію видів зношування.

Встановлено, що матеріал пар тертя в межах активного шару піддається пластичної деформації. Активним вважають поверхневий шар матеріалу, за яким відбувається безпосередній контакт. Ряд авторів [5, 9-13] вказують, що в цьому шарі відбуваються такі фізико-механічні явища:

- пружні деформації, пов'язані з дефектами кристалічної будови металу і викликають вищерблення;

Види зношування	Механічні
	Абразивне
	Гідроабразивне (газоабразивне)
	Гідроерозійне (газоерозійне)
	Кавітаційне
	Втомлюване
	Прифретинг
	Адгезійне
	Корозійно-механічне
	Окислюване

Рисунок 1.1 – Класифікація видів зношування.

- пластична деформація викликає зміщення кристалічних зерен, при цьому зростаючі напруги при багаторазовому повторенні призводять до руйнування поверхневого шару;

- пластична деформація призводить до зміцнення поверхневого шару (при температурі нижче температури рекристалізації).

В даний час для опису процесу абразивного зношування існує дві моделі [6], що відрізняються одна від одної характером взаємодії абразивних частинок з поверхнею металу:

- механохімічне руйнування поверхневого шару (пластичне деформування мікроб'ємів, їх окислення з подальшою руйнацією окислів плівок);

- механічне пошкодження поверхневого шару (впровадження абразивних частинок і подальше руйнування без зняття мікростружки).

Механохімічна модель абразивного зношування [6] має наступні фази:

- механічний контакт;
- пружно-пластичну деформацію;
- активацію (утворення тонкого шару деформованого металу);
- миттєву пасивацію (взаємодії активованого металу з хімічно активними компонентами ґрунту, утворення вторинних структур);
- руйнування вторинних структур подальшим механічним впливом.

Товщина вторинних структур може становити для різних типів ґрунтів, вологості і кислотності рН 0,01-0,05 мкм [14].

Механічна модель процесу абразивного зносу включає:

- механічний контакт;
- пружно-пластичну деформацію;
- впровадження абразивних частинок і руйнування поверхневих об'ємів без відділення частинок основного металу або зняття мікростружки.

Основний вплив на абразивний знос робочих органів ґрунтообробних машин має вміст абразиву (кварцового піску) в ґрунті. Якщо величину абразивного зносу на глинистих ґрунтах прийняти за 1,0, то на піщаних вона складе 1,5; на суглинках - 1,9; на супісках - 2,3 [15].

Абразив (кварцовий пісок) дряпає або знімає мікростружку з поверхні робочих органів ґрунтообробних машин, але на швидкість зносу впливає і присутня в ґрунті волога, яка має певну кислотність рН.

Зі збільшенням вологості ґрунту і фракції абразиву (0,25-1,00 мм) величина зносу збільшується на 25-50%.

Встановлено, що зі збільшенням вологості суглинних і глинистих ґрунтів різних генетичних типів (від повітряно-сухого стану до 60-80% відносної вологості) значення коефіцієнта тертя ґрунту по шліфованій сталі зростає, а після досягнення максимального значення зменшується [15-16] (рисунок 1.2, криві 3 і 4). При цьому чим важче механічний склад ґрунту, тобто чим більше в ньому вміст глинистих частин, тим більше значення коефіцієнта тертя ґрунту у вологому стані по сталі.

Збільшення значення коефіцієнта тертя на глинистих і суглинистих ґрунтах зі збільшенням вологості пояснюється зростанням сил міжмолекулярної взаємодії частинок ґрунту зі сталеву поверхнею, а зниження після переходу максимуму - появою на поверхні контакту вільної води, яка виконує роль «мастила» [15].

Межі зміни коефіцієнта тертя піщаних ґрунтів по сталі, обумовлені збільшенням вологості ґрунту, досліджені ще недостатньо, тому криві 1 і 2, зображені на малюнку 1.2, є, певною мірою, гіпотетичними.

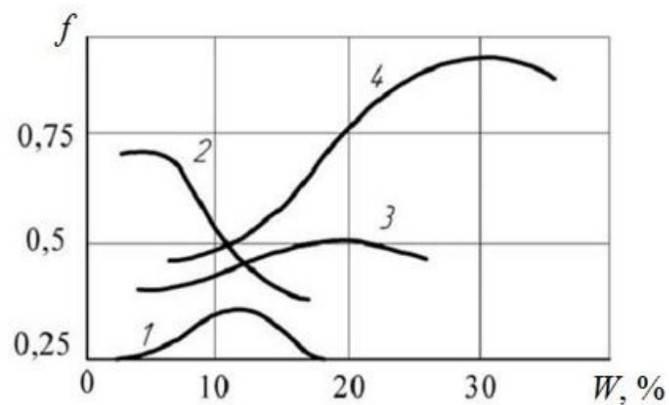


Рисунок 1.2 - Зміна коефіцієнта тертя і ґрунту по сталі в залежності від вологості [15]: 1 - піщаний ґрунт; 2 - супіщані ґрунти; 3 - середній суглинок; 4 - важкі суглинки і глини.

При збільшенні вологості пухких (позбавлених пов'язаності) піщаних ґрунтів від гігроскопічної до максимальної капілярності коефіцієнт тертя досягає максимального значення. При подальшому збільшенні вологості коефіцієнт тертя знижується. Це пояснюється наступним чином: при невеликій вологості ґрунту ковзання сталі по поверхні пухкого піску супроводжується перекатом шару піщинок, що знижує коефіцієнт тертя.

Підвищення вологості піску збільшує міжмолекулярні зв'язки, зменшується рухливість шару піщинок, відбувається прилипання ґрунту до поверхні, що призводить до збільшення коефіцієнта тертя. подальше зволоження піщаного ґрунту супроводжується появою вільної води, яка змащує поверхню тертя, коефіцієнт тертя при цьому знижується [14-15].

Максимальне значення коефіцієнта тертя ковзання сталі по піщаному ґрунту, що знаходиться в зв'язаному стані, спостерігається при невеликій вологості (рисунок 1.2, крива 2). Піщинки ґрунту, взаємодіючи зі сталлю, викликають її інтенсивний абразивний знос (дряпаючи її подібно наждачному паперу). Збільшення вологості ґрунту призводить до її

розм'якшення, знижується міцність закріплення в ґрунті піщинок, що зменшує коефіцієнт тертя.

У роботах, де вивчаються явища тертя і зношування, відсутня загальна думка про вплив швидкості переміщення ґрунту по сталі на коефіцієнт тертя ковзання. Ряд авторів [6-7] вважають, що зростання швидкості ковзання призводить до збільшення коефіцієнта тертя, інші [14] стверджують зворотне.

При швидкостях ковзання ґрунту по сталі в межах 0,5-4,0 м/с коефіцієнт тертя ковзання змінюється незначно і не впливає на знос [14].

В роботі [15] з вивчення впливу питомого тиску  $P$  ґрунту на поверхню сталі стверджується, що зростання  $p$  знижує коефіцієнт тертя, тому що внаслідок ущільнення ґрунту на поверхні сталі з'являються частинки води, що грає роль мастила.

Працездатність лемішними плугів багато в чому залежить від стану леміша. Леміш, підрізаючи пласт ґрунту, сприймає найбільший тиск в носовій частині і менше на кромці леза. Так, при глибині оранки  $h=22$  см і швидкості  $v = 1,4$  м/с. Тиск на носку леміша досягає 1,6-1,8 МПа [15].

Аналогічна ситуація складається і для лап культиватора. Все це призводить до нерівномірного абразивного зносу носка і ріжучої частини приблизно в два рази. При оранці ущільнених ділянок ґрунту, а також ґрунтів, засмічених камінням, тиск при наїзді леміша плуга на камінь збільшується «Стрибкоподібно». При наїзді на камінь надмірно зростає напруга контакту леза з каменем, що викликає викришування і пластичну деформацію леза в результаті як механічних перевантажень, так і миттєвого збільшення температури при наїзді леміша на камінь. За даними [17], по порівнянню з нормальними умовами тиск за час контакту збільшується в десять разів і більше (0,04-0,10 с).

Іншим негативним результатом кам'янистих включень є затуплення і знос лез. Затуплення лез робочих органів ґрунтообробних машин погіршує

підрізання бур'янів і збільшує тяговий опір машин, порушує стійкість їх ходу по глибині [17, 18].

Ресурсні випробування лемішів при оранці ґрунтів, що містять абразив в вигляді кварцового піску, показали, що до 50% їх вибраковують через вигин і поломку носка, при цьому знос леза не досягає граничного стану.

На чорноземах більш інтенсивно зношується лезо леміша. після напрацювання 3-4 га він набуває заокруглену форму і потрібне відновлення леза відтягненням [15-16].

На піщаних ґрунтах робочі органи ґрунтообробних машин, відновлені традиційними методами наплавлення, працюють незадовільно. Ресурс відновленого леміша становить, як і для нового, 5-6 га [15]. Необхідні аналіз причин низького ресурсу і вдосконалення технології зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин.

При обробці міжрядь і при передпосівній обробці ґрунту в основному використовуються культиватори, їх основний робочий орган - культиваторні лапи. Виготовляються вони з сталей 65Г, 43Л і Л53, які в загартованому стані мають твердість HRC 37-43, задовільні показники відносного подовження -  $\delta = 6,5 - 7,2\%$ , але низька межа міцності  $\delta_B = 880 - 1080$  МПа [19-24].

Практика експлуатації показала, що ресурс їх на різних ґрунтах не перевищує 14-19 га [9, 12, 15, 17, 19-21], хоча за технічними вимогами він повинен бути не менше 25 га. Характерний профіль зносу робочих органів ґрунтообробних машин показаний на малюнку 1.3 [17]. З абразивних частинок, присутніх в ґрунтах і діючих на робочі органи ґрунтообробних машин, переважає кварц (HV 10,5-12,5 ГПа) і польовий шпат (HV 6,5-7,2 ГПа) [17, 19-20]. Ці два мінерали, будучи основою піщаних і супіщаних ґрунтів, пояснюють швидкий знос робочих органів.

Ряд авторів [9, 12, 15, 17, 19-21, 25-26] стверджують, що абразивний знос переважає над іншими видами зносу, в разі якщо твердість абразиву перевищує твердість матеріалу робочого органу ґрунтообробних машин.

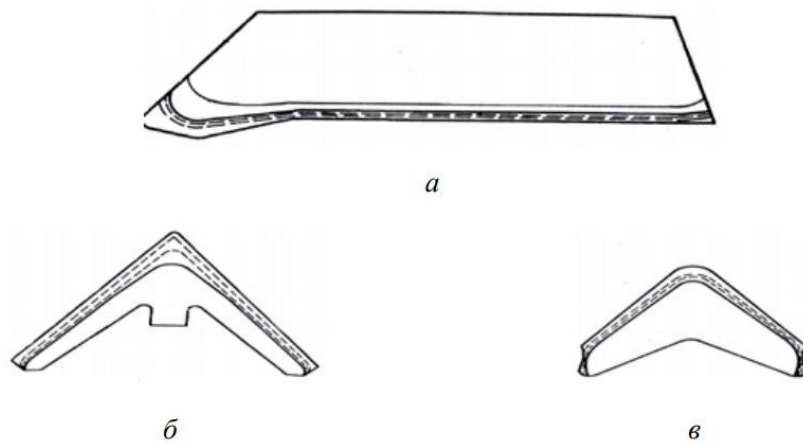


Рисунок 1.3 - Профіль зносу робочих органів ґрунтообробних машин:  
а - леміш плуга; б - лапа культиватора із захопленням 270 мм; в - лапа  
культиватора із захопленням 150 мм.

У нашому випадку при використанні робочих органів культиватора стерньового важкого виробництва фірми Bellota (додаток А) твердість матеріалу в стані поставки становить 4,8-5,0 ГПа. твердість частинок кварцового піску HV 10,5-12,5 ГПа. Співвідношення твердостей лежить в межах 2,1-2,5. При такому співвідношенні буде відбуватися інтенсивний знос матеріалу.

Таким чином, при експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин спостерігається в ряді випадків ударно-абразивний характер зносу, викликаний контактом з частинками ґрунту і камінням. Супутні фактори впливають на знос: механічний склад ґрунту; вологість; твердість; структура матеріалу; тиск і швидкість відносного переміщення ґрунту по поверхні робочих органів ґрунтообробних машин.

## 1.2. Матеріали і методи підвищення зносостійкості

У сільськогосподарському шинобудуванні підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин проводилися в основному в наступних напрямках:



- використання зносостійкого матеріалу і багатошарового прокату;
- розробка складових робочих органів;
- термічні і термохімічні обробки;
- наплавлення і напилення зносостійких матеріалів.

При виборі методу зміцнення в залежності від типу ґрунтів слід враховувати не тільки технологічні та економічні показники, а й необхідність реалізації ефекту самозаточування робочих органів.

Сутність ефекту самозаточування полягає у вибіркового зносі неоднорідного по перерізу леза, при якому зберігаються необхідна форма і ріжучі властивості робочого органу [6, 7, 9, 14-24].

З метою підвищення терміну служби і забезпечення ефекту самозаточування виробляються біметалічні леміші трапецієподібної форми з двошаровою катаною частиною леза зі сталі Х6Ф1 (нижній шар) і Л-53 (верхній шар) [6]. Вони мають підвищений термін служби, але їх відновлення пов'язано з технологічними труднощами - необхідно виготовлення спеціалізованого оснащення для обробки металів тиском.

Термічна обробка є однією з найпоширеніших технологічних операцій для зміцнення. Твердість металу досягає HRC 40-46 для сталі 45, HRC 55-61 - для сталі 65Г і легованих сталей. Зносостійкість таких робочих органів менше в порівнянні з деталями, виготовленими зі спеціальних матеріалів. При застосуванні таких робочих органів на суглинних ґрунтах не спостерігається самозаточування [18].

Знос культиваторних лап з індукційним загартовуванням (ширина шару загартування - 8-10 мм, HRC 48-52) за сезон складе 30 мм, при цьому не забезпечується якість обробки [18].

Застосування для зміцнення робочих органів лазерної термообробки в 1,5 рази знижує знос в порівнянні з об'ємним гартуванням. Лазерна наплавка сплавом ПС-14-60 + 6% В4С знижує знос в 1,7-1,8 рази в порівнянні з індукційним загартовуванням [6].

Лазерні технології забезпечують локальний нагрів з відсутністю мінімальних деформацій і охолодження за механізмом теплопровідності в глибину поверхні матеріалу, як правило, без використання охолоджувального середовища. Отримати поверхневий шар з високими зносостійкими властивостями, можна використовуючи високу швидкість нагріву і охолодження 104-106 °C/с. так, наприклад, розроблена технологія лазерного зміцнення і наплавлення дисків борін діаметром 510 мм зі сталі 65Г. Ширина зміцненої зони становить 15-16 мм, напавленої зони - 16-18 мм. Експериментальні диски борін по порівняно із серійними деталями мали менший знос по масі на 31% [8].

Однак через складність технології та відсутність обладнання, його недосконалості і високу собівартість ці процеси поки не знайшли промислового застосування.

Наплавлення дозволяє підвищити зносостійкість деталей машин. Наплавлювальні матеріали - самозахисні порошкові дроти типу ПП-АН170 (ПП-АН170М), забезпечують утворення напавленого шару твердістю HRC 60-65. Регулювання геометрії напавленого шару (висота, глибина, крок напавлення), а також співвідношення твердості напавлених ділянок і основного металу в межах 1,5: 1,0; 1,0: 1,0 визначають оптимальну зносостійкість і самозагострювання [9]. Леза робочих органів із змінною геометрією напавлення в процесі обробки ґрунту через різницю в зносостійкості основного і напавленого шарів самозаточуються і утворюють хвилясто-ступінчасту форму леза, знижуючи при цьому тяговий опір орного агрегату [15].

Є дані експериментів по зміцненню лемішів плугів напавленням зношеної частини електродом Т-590 і порошковим сплавом «Сормайт-1» вони утворюють в структурі напавленого шару карбідні включення, підвищують мікротвердість і його опір зносу [6-9, 14-21, 25-26].

За критерієм «ціна-якість» кращим для зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин є використання композиційних матеріалів «міцна,

пластична основа - зносостійке покриття». До робочих органів ґрунтообробних машин, що виготовляються на підприємствах великими партіями, повинні застосовуватися зміцнюючі технології на стадії виготовлення. Зміцнюючі технології повинні відповідати виду виробництва: бути продуктивними, економічними та відповідати вимогам щодо забезпечення заданої товщини і зносостійкості покриттів.

Газотермічне напилення (ГТН) дозволяє забезпечити великий термін служби робочих органів, скоротити час проведення робіт по зміцненню і знизити їх вартість [6-9, 14-21, 25-26]. При ГТН розпорошується матеріал у вигляді порошку або дроту подається в зону нагріву. Газ розпорошує нагріті частинки і надає їм прискорення в осьовому напрямку. У зоні нагріву при подачі дроту розпилюючи газ диспергує розплавлений матеріал, в ряді методів ГТН він виконує і функцію нагріву. Частинки, що надходять на поверхню, мають велику швидкість зіткнення, утворюють, міцні міжатомні зв'язки та створює умови для адгезії розпленого матеріалу за рахунок активації поверхневого контакту.

Всі методи ГТН класифікують за видом використовуваної енергії і джерела теплоти. По виду енергії діляться на газоелектричних, в яких використовуються електроенергія і газополум'яневі методи, де теплова енергія утворюється за рахунок згоряння горючих газів. Для нагріву розпорошуваного матеріалу використовують такі види джерела теплоти: дугу, плазму і газове полум'я.

Методи напилення називають дугового металізацією, плазмовим напиленням, газополум'яневим напиленням і детонаційним-газовим напиленням. До газоелектричних відносяться перші два методи, останні – до газополум'яневих [9, 21-24].

Ефективність методів ГТН визначається коефіцієнтом використання енергії, що підводиться, коефіцієнтом використання напилюваного металу, продуктивністю, якістю покриттів і вартістю їх нанесення. Дугова

металізація (ДМ) переважно в порівнянні з іншими способами ГТН по тепловій ефективності, продуктивності та вартості покриттів.

Ефективний ККД нагріву при дуговій металізації становить в середньому 60%, тобто частка енергії, що підводиться, йде безпосередньо на нагрівання і плавлення порошкового матеріалу. Низькі теплові втрати обумовлені фізичними особливостями процесу. При ДМ дріт розплавляють в дугою, що горить між ним, і порошком, що транспортується газом, а утворювані частинки прискорюються і при попаданні на поверхню формують покриття. Пряма передача енергії від дуги до дроту обумовлює високу теплову ефективність ДМ. Частка введеної теплової енергії від дуги, що йде на розплавлення порошкового матеріалу, становить 60-70%, що в 7-10 разів більше, ніж для інших способів ГТН, і обумовлює високу продуктивність ДМ - до 18 кг/год при розпилюванні сталі. Крім того, дріт в 2-3 рази дешевше порошків, застосовуваних для інших способів ГТН.

Поєднання високої продуктивності з використанням дротів призводить до зниження в 3-10 разів витрат на отримання ДМ-покриттів в порівнянні з іншими методами напилення (таблиця 1.1) [9].

Таблиця 1.1

Показники ефективності методів ГТН\*.

Метод	Ефективний ККД нагріву. %	Продуктивність, кг/год
ГП	10	7
ГПС	60	25
ПН	12	5
ДМ	85	18

\* ГП - газополуменеве; ДМ - дугова металізація; ПН - плазмове; ГПС - газополуменеве надзвукове.

Фізико-хімічні особливості процесу ДМ пов'язані зі складністю в отриманні якісних покриттів. Це пов'язано з вигоранням легуючих елементів в матеріалі який наноситься, і насичення порошкового металу газами з

атмосфери в зоні горіння дуги. Типове ДМ-обладнання характеризується широким кутом розпилу, до  $70^\circ$ , невисоким, 0,5-0,6, коефіцієнтом використання металу, зниженням концентрації легуючих елементів і надмірним вмістом оксидів в покритті.

Для усунення зазначених недоліків створено обладнання активованої дугової металізації (АДМ), яке відрізняється від типового тим, що використовуються продукти згорання (пропаноповітряна суміш) в якості транспортера газу. У АДМ-апаратах кут розпилення становить  $10^\circ$  градусів, коефіцієнт використання матеріалу досягає 85%, швидкість частинок - 140-200 м/с, ступінь окислення сталевих покриттів - 2,1-2,9%, пористість - 2%. В середньому рівень параметрів на 40% вище в порівнянні як з вітчизняними, так і з закордонними ДМ-установками [7, 25-26].

Як матеріали для нанесення зносостійких покриттів при ПН і ДП використовують дорогі порошки сплавів на основі нікелю [6]. Для ДМ поширення набули економно леговані порошкові дроти (ПД) на основі заліза типу Fe-Cr-V, що дозволяють, на відміну від суцільних дротів (СП), простіше отримати зносостійкі покриття необхідної системи легування, що необхідно для варіювання складу покриття при різних режимах зношування. Покриття із зазначених ПП [7, 25-26] забезпечують підвищення зносостійкості сталей в 2-5 разів і переваги ДМ при напиленні на робочі органи сільськогосподарських машин.

Слід зазначити, що при підвищених контактних навантаженнях і наявності ударів найбільшу небезпеку становить знос за механізмом внутрішнього тертя. Для покриттів він обумовлений, ймовірно, виникненням і розвитком мікротріщин по оксидним плівкам. Оксидні плівки і тим більші пори можуть сприяти відшаровуванню металу за механізмом внутрішнього тертя, збільшуючи швидкість механічного зносу металевих покриттів. Оксидні плівки, що формуються в процесі напилення, грають двояку роль. З одного боку, це одна з найбільш твердих складових структур покриття, її мікротвердість - 5-6 ГПа. З іншого боку, оксиди є тендітною частиною

структури, що відрізняється низьким зчепленням з іншими складовими. Тому для кожного виду покриття є область оптимального вмісту оксидів. З урахуванням вищесказаного необхідно розглянути особливості формування металізаційних покриттів і методи вдосконалення технології їх нанесення, що дозволяють забезпечити зносостійкість покриттів при ударно-абразивному зношуванні, характерному для умов експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин [6-9, 14-21, 25-26].

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ТЕМАТИКИ

### 2.1 Формування властивостей покриттів при дуговій металізації

Металізаційні покриття складаються з шаруватих елементів, сформованих при високошвидкісному ударі об холодну поверхню і подальшому твердінні частинок, рисунок 2.1. Розплавлені або розігріті до пластичного стану частинки розхлюпується по поверхні, зачеплені попередньо по її нерівності і потім контактуючи між собою.

На дистанції напилювання відбувається окислення частинок, і утворюється оксидна плівка, що потрапляє в покриття. Вона впливає на властивості покриття: може перешкоджати дифузії частинок, впливати на міцність зчеплення, твердість покриття. Внаслідок малого розміру або низькій швидкості окремі частинки встигають охолонути до моменту удару об підкладку нижче точки плавлення, а їх кінетичної енергії недостатньо для деформування. Це призводить до того, що вони залишаються в покритті в глобулярній формі.

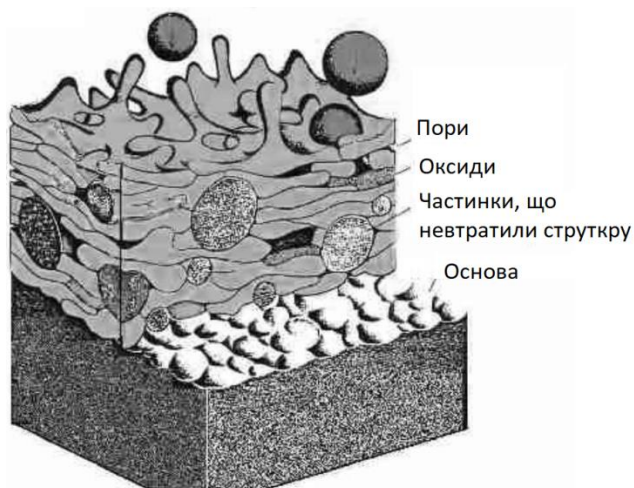


Рисунок 2.1 - Схема формування покриття.

При напиленні декількох шарів на поверхні останнього відбувається нанесення фракцій у вигляді пилу розплавленого матеріалу або його оксидів і адсорбція газів. Крім того, через високу швидкість при напиленні

відбувається розтікання і кристалізація частинок при контакті з раніше нанесеною поверхнею, що веде до дефектів і порожнин, появи мікропорожнеч, наповнених газом. Частина перегрітих вище точки плавлення частинок можуть випаровуватися і осідати в паровій фазі [7, 25-26].

Рисунок 2.2 відображає схему формування одержуваних покриттів, що складаються з нерозплавлених частинок, оксидів, пор, тонких пластин з'єднаних між собою або звареними ділянками, або шляхом «Схоплювання» утворених під час кристалізації і затвердіння.

Міцність і щільність покриття нижче, ніж у основного матеріалу, тому що зварні ділянки не заповнюють всю площу контакту між нанесеними частинками. В отриманих покриттях чітко виділяються границі між шарами і частинками, які визначають міцність зчеплення між покриттям і підкладкою (1) - адгезію покриття, і міцність зчеплення в самому шарі - когезію (2,3). Пошарові границі (2) виникають через інтервал нанесення частинок, що призводить до забруднення поверхні шару і погіршення контактних процесів на границі. Характер утворення границь між шарами (2) і частинками (3) різний і визначається тривалістю перебування частинок в атмосфері [6-9, 14-21, 25-26].

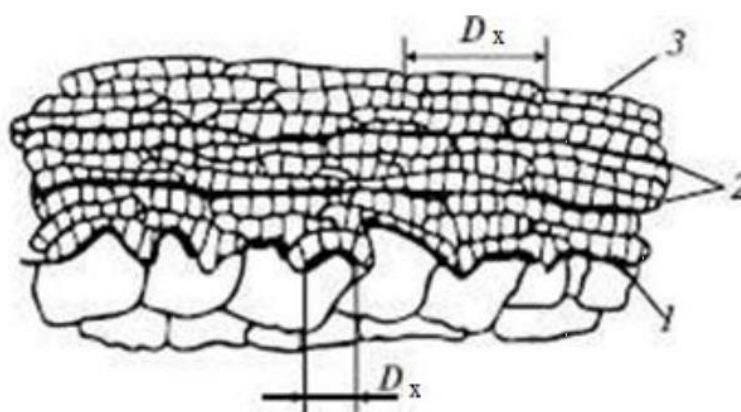


Рисунок 2.2 - Схема структури покриття: 1 - межа між покриттям і основою; 2 - межа між шарами; 3 - межа між частинками в шарі;  $D_x$  - діаметр ділянки контакту, на якій відбулося приварювання частинок.



Адгезійна міцність покриття може бути обумовлена наступними механізмами:

- механічне зчеплення нанесених частин з поверхнею підкладки або з попередньо осадженими частинками;

- енергією активації, коли тепло від нанесеної частки буде досить для утворення необхідної кількості тепла на поверхні матеріалу або попередньо нанесеної частки для дифузії взаємні переплавки. Це зумовить наявність хімічних реакцій в зоні частинки і підкладки, тобто металургійний зв'язок;

- наявність ван дер Вальсових сил, коли утворюється фізична взаємодія між частинками і основою в результаті зближення атомів на відстань порядку розмірів атомів.

Узагальнюючи різні оцінки вкладу кожного виду зв'язку, можна зробити висновок, що зазвичай частка металургійного зв'язку мала, в іншому випадку опір розриву покриття наближається до такого у вихідного матеріалу [6-9, 14-21, 25-26].

Таким чином, процеси, що відбуваються в двофазному потоці впливають на властивості покриттів і особливостями, визначальними для напиленого матеріалу будуть:

- зміна складу частинок напилюваного матеріалу при взаємодії з навколишнім середовищем;
- висока швидкість кристалізації і деформація при ударі частинок;
- характер контактів між частинками в покритті.

Розглянемо, як особливості формування металізаційного покриття відображаються в його структурі і визначають характер дефектів, які можуть відрізнятися за розмірами, щільності, морфології і орієнтації.

В роботі [15] на металографічних шліфах ДМ-покриття на прикладі сталі 20X13 описується будова напилюваного шару. Яка складається з дуже тонких по черзі розміщених хвилеподібних прошарків білого і сіро-блакитного кольору, ймовірно, що представляють собою, затверділий метал і оксиди. Присутні також ділянки змішаної структури, що складаються з

металу і оксидів. Видно окремі частинки металу більш округлої форми, і глобулярної. Крім того, є пори глобулярної і дископодібної форми.

Виходячи з умов утворення покриття, можна припустити, що дископодібні пори формуються між шарами внаслідок недостатнього пошарового змочування крапель. Глобулярні пори сформовані в результаті недостатнього заповнення твердіючого шару. Під час травлення зразки спочатку проявлялася на тонких шарах металу; важче протравлюються більш товсті шари і великі частки. Слабке травлення структурних складових у порівнянні світлими ділянками, дає припущення, що це метал, з високим вмістом хрому. Структура точкового характеру виявляється в глобулі і тонких шарах металу, схожа на структуру відпущеного мартенситу.

Поєднання малого розміру часток і їх високих швидкостей в момент удару призводить до високих швидкостей охолодження. Аналіз фазового складу металізаційних покриттів з сталей 20X13 і 40X13 показав, що в них практично відсутні карбіди, хоча по діаграмі рівноважного стану Fe-Cr-C для сталей типу 20X13, 40X13 структура складається з  $\alpha$ -фази і карбідів типу  $Me_23C_6$  [15]. Ймовірно, високі швидкості охолодження перешкоджають виділенню карбідів з розчину.

Результати вимірів мікротвердості ДМ-покриттів з сталей 20X13 і 40X13 показують, що залежності мікротвердості по висоті шару не виявлено. Мікротвердість змішаних ділянок і чистого металу у сталі 20X13 практично однакова: по товщині покриття вона нерівномірна і варіюється від 4,8 до 5,2 ГПа. Мікротвердість оксидів має значення від 5 до 6 ГПа, тобто вище твердості ділянок чистого металу. Округлі частки (Глобули) мають мікротвердість в межах 4,5-5,9 ГПа. Спостерігаються аналогічні результати у сталі 40X13, інтервал значень знаходиться вище: 5,0-6,4 ГПа.

Пошаровий хімічний аналіз покриттів, напилених ДМ-апаратом, показав, що вміст елементів практично однаковий по глибині напилюваного шару, але в процесі напилення відбувається їх вигорання в порівнянні з вихідним вмістом [15].

Для оцінки впливу складу атмосфери транспортного газу на особливості формування металізаційного покриття були підготовлені зразки із застосуванням різних варіантів металізації. За базу для порівняння обраний серійний апарат ЕМ-14. В апараті АДМ-10 для розпилення використовуються продукти згоряння пропаноповітряної суміші.

Можна припустити, що округлі частки металу потрапили в покриття в вже затверділому стані, з розміром частинок менше 30 мкм.

Слід зазначити, що покриття отримані при розпилюванні в повітряному середовищі мають грубу неоднорідну структуру з витягнутими по шарам порами і великими частками.

При використанні пропаноповітряного середовища були отримані покриття з більш тонкою структурою, пор і пустот значно менше і вони дрібніше. В структурі менше оксидів, а оксидні плівки тонше. Тому слід відзначити, що покриття отримані при використанні пропаноповітряного середовища, отримані на АДМ-апаратах більш кращі.

Дослідження мікротвердості порівнюваних покриттів показали, що мікротвердість покриттів вище при використанні відновлювальної атмосфери, одержуваної з застосуванням пропаноповітряного середовища. Підвищення мікротвердості для різних структурних складових становить 6-12% і знижується пористість покриттів. Відзначається, що кисень в складі транспортного газу призводить до збільшення пористості покриттів, збільшення числа і розмірів прошарків оксидів, а підвищення пористості знижує когезійну міцність, тому що пори - це порожнечі з нульовою міцністю.

Стосовно до покриттів зі сталі 20Х13 було вивчено вплив на зносостійкість ступеня окислення крапель металу. За еталон прийнятий зразок з покриттям, напиленням апаратом ЕМ-14 без застосування відновлювальної атмосфери. З ним порівнювалися зразки з покриттями, нанесеними апаратом АДМ-10. В роботі [25] встановлено, що зниження ступеня окислення крапель, і як результат - ступеня окислення покриття,

призводить до підвищення стійкості покриттів до ударно-абразивного зносу в кілька разів. Варто зазначити, що стосовно АДМ-покриттям з ПП системи легування Fe-V-Cr-Al-Y подібні дослідження не проводилися (додаток Б).

Проведені випробування матеріалів (30ХГСА, 65Г, 51ХФА, 20Х13) показали, що покриття зі сталі 20Х13 мають найкращі результати. Відносна зносостійкість в 2-5 разів вище, ніж у покриттів з інших матеріалів. Покриття зі сталі 20Х13 є відпущений мартенсит і структурні перетворення в ньому будуть супроводжуватися напруженнями стиску, сприятливими для експлуатаційних навантажень. Тому в подальшому в якості еталону при випробуваннях зносостійкості покриттів були прийняті зразки АДМ-покриттів з суцільного дроту 20Х13.

Таким чином, для зменшення оксидної плівки на поверхні частинки, як одного з найбільш доступних на практиці способів підвищення властивостей покриттів, необхідно створення захисної атмосфери, особливо в зоні горіння дуги, а також легування порошкового металу елементами – розкислювачами [6, 15, 25].

З зіставлення отриманих даних і результатів структурних досліджень щодо впливу складу транспортного газу на число і розмір прошарків оксидів в покритті можна зробити висновок про те, що для конкретного матеріалу існує критичне число оксидів в покритті, визначальне максимум на кривій зносостійкості.

## 2.2. Залежність властивостей покриттів від системи легування матеріалу

Моделювання процесу надходження кисню в частки, що розпилюються дає можливість вибрати систему легування розпилюваного матеріалу, реалізація якої дозволяє отримати необхідну кількість оксидів в металізаційному покритті і необхідні показники його властивостей. Разом з тим оптимізацію технологічних параметрів дугової металізації доцільно виконувати по незалежному критерію, який визначає працездатність

покриттів при експлуатації. В умовах ударно-абразивного зношування таким критерієм є адгезійна міцність покриттів, що показує їх здатність чинити опір відшарування від основи.

Для аналізу залежності властивостей покриттів від складу розпилюваного матеріалу прийнята модель окислення частинок при дуговій металізації, представлена в роботах [6, 15, 25].

Автори описали процес ДМ, що складається з трьох зон, які відрізняються особливістю взаємодії розпилюваного металу з киснем в кожній зоні.

Перша стадія описує поведінку металу на торці електрода. Метал підводиться до зони взаємодії і відводиться від неї в краплю. У газовій фазі концентрація кисню постійна. Температура металу на торці прийнята 2500 К, коефіцієнт масопереносу кисню в металі  $\beta_{Me} = 0,25$  см/с, коефіцієнт масопереносу кисню в газі  $\beta_{\Gamma} = 1,81 \dots 10^2$  см/с [6, 15, 25].

Друга стадія характеризує метал в зоні горіння дуги. У зоні горіння дуги, за рахунок дії газодинамічного напору і сил поверхневого натягу, струмінь рідкого металу знаходиться в вигляді «язика» товщиною  $\sim 10 \cdot 10^{-6}$  м. У перетяжках, що утворюються під дією перепаду тиску газу, йде інтенсивне виділення Джоулевого тепла через підвищення омичного опору, внаслідок чого відбувається розрив струменя рідкого металу за рахунок спільних процесів закипання рідкого металу і ударного розширення газу у перетяжках. Прийнято, що це призводить до підвищення температури в перетяжках до 2900 К. Величина коефіцієнта масопереносу кисню в металі прийнята  $\beta_{Me} = 0,25$  см/с (як для першої стадії), коефіцієнт масопереносу кисню в газі  $\beta_{\Gamma} = 7,92 \cdot 10^2$  см/с. Для розрахунків використовувалося спрощення, згідно з яким в зоні горіння дуги знаходяться краплі металу сферичної форми з умовним діаметром, рівним товщині «язика»  $d_p = 10 \cdot 10^{-6}$  м. Після закінчення зони горіння дуги фракційний склад відповідає даними гранулометричного аналізу [6, 15, 25].

Третя стадія описує політ крапель по дистанції напилювання. Приблизно після 10% дистанції напилювання температура крапель знижується до 1809 К і залишається незмінною до кінця дистанції за рахунок значній ентальпії плавлення. Швидкості частинок змінюються в інтервалі 120-250 м/с, за рахунок чого різниться час взаємодії крапель з киснем і коефіцієнт масопереносу кисню в металі. Температура газу знижується до 600-800 К.

Величина коефіцієнта масопереносу кисню в металі прийнята  $\beta_{Me} = 0,025$  см/с, коефіцієнт масопереносу кисню в газі  $\beta_{\Gamma} = (5,93-5,76) \cdot 10^3$  см/с (по дистанції напилювання).

Для відкритої системи, при наявності надходження і відведення реагентів, описати процес надходження кисню в краплю можна визначити відповідно до рівняння:

$$\frac{dm_o}{dt} = \frac{g_{пл} \cdot [O]_0}{100} - \frac{g_{ввм} \cdot [O]}{100} + \frac{\beta_{Me} \cdot \rho \cdot f}{100} \cdot ([O]' - [O]) \quad (2.1)$$

де  $m_o = \rho \cdot V \cdot [O]$  - кількість кисню в розплавленому металі, кг;  $\rho$ ,  $V$  - щільність, кг/м<sup>3</sup>, об'єм, м<sup>3</sup>, розплавленого металу;  $g_{пл}$ ,  $g_{ввм}$  - швидкості плавлення і відведення металу, кг/с;  $\beta_{Me}$  - коефіцієнт масопереносу в металі, м/с;  $f$  - площа реакційної поверхні, м<sup>2</sup>;  $[O]_0$ ,  $[O]$ ,  $[O]'$  - вихідна, поточна, на поверхні розділу фаз концентрація кисню, мас. % [6, 15, 25].

На першій стадії на торці електрода встановлюється квазістаціонарний стан, коли швидкості підведення і відведення реагентів однакові і обсяг рідкого прошарку на торці електрода постійний:  $\frac{dm_o}{dt} = 0$ .

На другій і третій стадіях в зоні горіння дуги і в польоті крапля являє собою закриту систему, в якій надходження та відведення металу не відбувається:  $\frac{g_{пл} \cdot [O]_0}{100} = \frac{g_{ввм} \cdot [O]}{100} = 0$ .

Додаткове рівняння для знаходження концентрації кисню на поверхні краплі  $[O]'$  виходить з умови рівності дифузійних потоків на межі поділу фаз:.

Дані дифузійні потоки знаходяться через парціальні тиски і концентрації кисню в газі і рідкому металі:

$$I_{\Gamma} = \beta_{\Gamma} \cdot (C_{O_2}^0 - C'_{O_2}) = \frac{\beta_{\Gamma}}{2 \cdot R \cdot T} \cdot (P_{O_2} - P'_{O_2}) \quad (2.2)$$

$$I_{Me} = \beta_{Me} \cdot (C_{[O]}^0 - C_{[O]}) = \frac{\beta_{Me} \cdot \rho}{M_O} \cdot ([O]' - [O]) \quad (2.3)$$

З врахуванням виразу (2.14), (2.15):

$$A_1 \cdot \left( P_{O_2} - \frac{([O]')^2}{k^2} \right) = [O]' - [O] \quad (2.4)$$

де  $P'_{O_2} = \frac{([O]')^2}{k^2}$ ,  $A_1 = 100 \cdot \beta_{\Gamma} \cdot \frac{M_O}{(2 \cdot \beta_{Me} \cdot R \cdot T \cdot \rho)}$ ;

$$\lg k = \frac{6120}{T} + 0,15 \quad (2.5)$$

$P_{O_2}$  – Парціальний тиск, МПа;  $C_{O_2}^0$  – концентрація кисню в рідкому металі;  $\beta_{\Gamma}$  – коефіцієнт масопереносу в газі, м/с.

Фізична модель надходження кисню в краплю при ДМ показана на рисунку 2.3. При поверхневій концентрації кисню  $[O]'$ , меншою межі насичення  $[O]_{Fe}^{нас}$ , відбувається розчинення кисню в рідкому металі [7]:

$$\lg [O]_{Fe}^{нас} = \frac{-6120}{T} + 2,734 \quad (2.6)$$

Внаслідок високих температур на торці електрода і в зоні горіння дуги, межа розчинності кисню в металі значно вище, ніж при польоті крапель по дистанції, при цьому питома поверхня крапель в зоні горіння дуги значно більше в порівнянні з площею торця електрода. Таким чином, в зоні горіння дуги створюються найбільш сприятливі умови для надходження кисню в метал. На першій і другій стадіях надходить кисень розчиняється в рідкому металі. На третій стадії температура крапель знижується до температури плавлення, що призводить до зниження межі розчинності і до виділенню кисню з розчину.

Кисень, що виділяється зв'язується в оксиди, що утворюють шлакову плівку на поверхні краплі. За рахунок впливу потоку транспортного газу шлак відтісняється з кормової частини краплі в носову, залишаючи її відкритою для надходження кисню, рисунок 2.4. У носовій частині

відбувається перерозподіл елементів між шлаком і металом. У розрахунках прийнята частка поверхні, вільної від шлаку,  $L = 0,5$ .

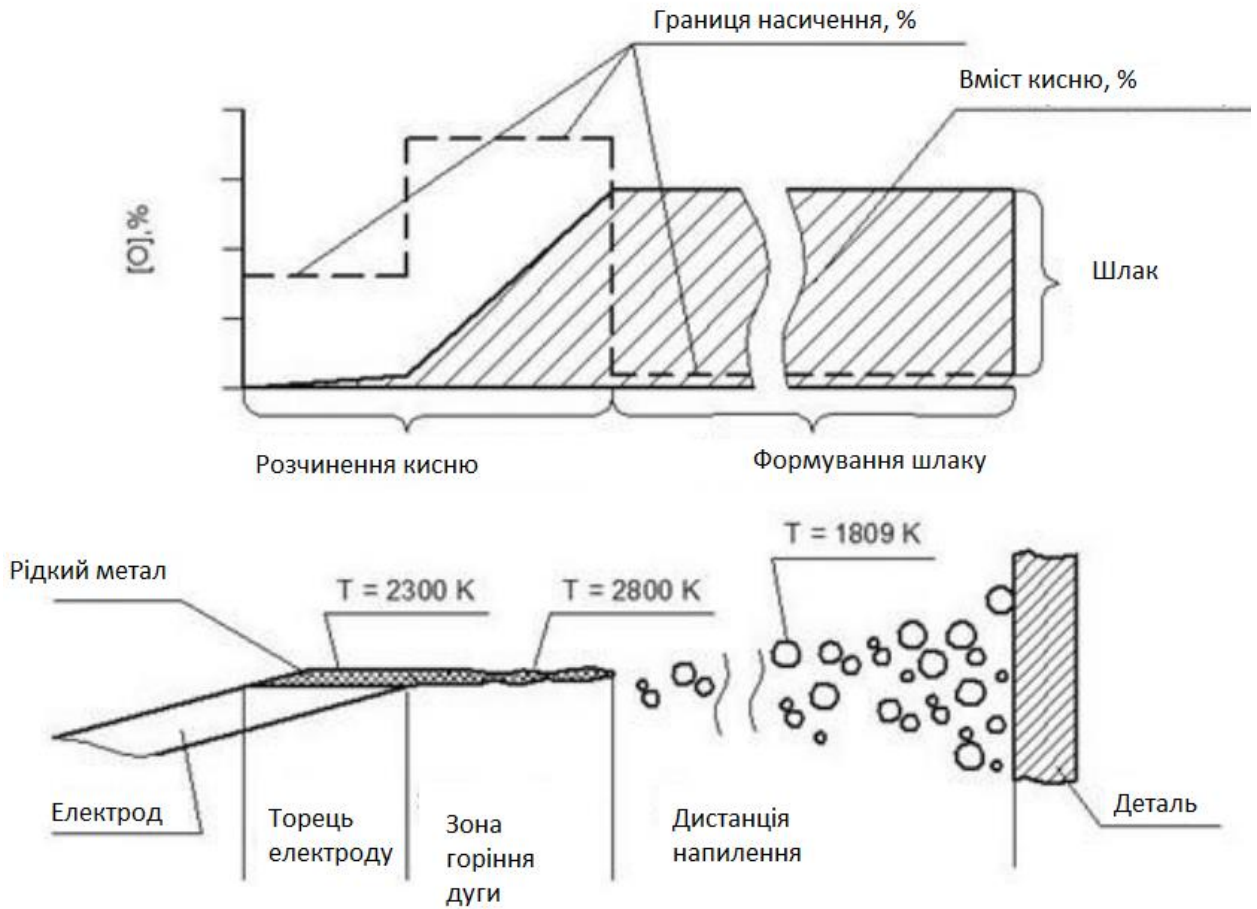


Рисунок 2.3 - Фізична модель надходження кисню при ДМ.

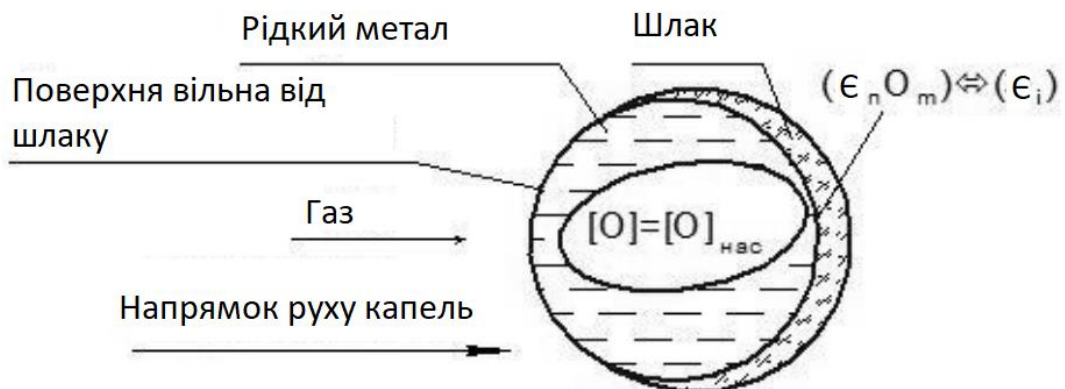


Рисунок 2.4 - Схема надходження кисню в краплю при ДМ.

При  $[O]' > [O]_{Fe}^{нас}$  весь кисень, що подається з атмосфери йде на утворення шлаку. Вміст кисню в металі визначимо при  $[O]' = [O]_{Fe}^{нас}$ . Дифузійний потік з газу в метал  $I_T$  дорівнює



$$I_{\Gamma} = \beta_{\Gamma} \cdot \left( P_{O_2} - \left( \frac{[O]_{\text{нас}}}{k} \right)^2 \right) / (2 \cdot R \cdot T) \quad (2.7)$$

Додатковий кисень, що виділяється з пересиченого розчину при зниженні температури крапель поза зоною горіння дуги. Додатковий дифузний потік  $I_{\text{дод}}$  дорівнює

$$I_{\text{дод}} = \beta_{\Gamma} \cdot \rho \left( P_{O_2} - ([O]_{\text{нас}} - [O]) \right) / (100 \cdot M_O) \quad (2.8)$$

Кількість шлаку, що утворюється в носовій частині на кроці  $\Delta\tau$ :

$$\Delta m_{\text{к}} = (I_{\Gamma} + I_{\text{дод}}) \cdot F \cdot \Delta\tau \cdot L \cdot M_{FeO} / 100 \quad (2.9)$$

У порівнянні з попереднім кроком маса рідкого металу зменшиться за рахунок переходу заліза в шлак:

$$m_{Me}^{n+1} = m_{Me}^n - \Delta m_{\text{ш}} \cdot M_{\epsilon} / M_i \quad (2.10)$$

Кількість шлаку додається до вже утвореного шлаку. Вміст компонентів шлаку на кроці після процесів в кормовій частині:

$$(FeO)^{n+1} = ((FeO)^n \cdot m_{\text{ш}} / 100 + \Delta m_{\text{ш}}) / (m_{\text{ш}} + \Delta m_{\text{ш}}) \quad (2.11)$$

$$(\epsilon_{\text{к}} O_{\text{м}}) = (\epsilon_{\text{к}} O_{\text{м}}) \cdot m_{\text{ш}} / ((m_{\text{ш}} + \Delta m_{\text{ш}}) \cdot 100) \quad (2.12)$$

Крім утворення шлаку буде йти його взаємодія з металом, при цьому в першому наближенні можна знехтувати впливом реакцій між шлаком і газовою фазою. Основи аналітичного опису кінетики процесу викладені [6]. Взаємодія металу і шлаку на кордоні розділу описується комплексом реакцій окислення домішок із загальним реагентом  $FeO$ :

$$\frac{n}{m} [\epsilon_i] + (FeO) = \frac{1}{m} (\epsilon_{in} O_{\text{м}}) + [Fe] \quad (2.13)$$

де  $[\epsilon_i]$  - реагенти.

З умови, що перебіг кожної реакції супроводжується споживанням певної кількості  $FeO$ , сумарний дифузійний потік компонентів дорівнює дифузійному потоку  $FeO$ :

$$I_{FeO} = I_1 + I_2 + \dots I_i + \sum I_i = \sum \frac{n}{m} I_{\epsilon_i} \quad (2.14)$$

Виразимо  $I_{FeO}$  і  $I_{\epsilon_i}$  через змінну  $x$ , використовуючи рівняння

$$x = \frac{(FeO)'}{[Fe]'} = \frac{1}{K_i} \frac{(\epsilon_{in} O_{\text{м}})^{1/m} \cdot (1 + I_{\epsilon_{in} O_{\text{м}}} / I_{\epsilon_{in} O_{\text{м}}}^{\text{II}})^{1/m}}{[\epsilon_i]^{n/m} \cdot (1 - I_{\epsilon_i} / I_{\epsilon_i}^{\text{II}})^{n/m}} \quad (2.15)$$

$$I_{FeO} = \left( \frac{(FeO)}{[Fe]} - x \right) / \left( \frac{x^m}{I_{Fe}^n} + \frac{(FeO)}{[Fe] \cdot I_{Fe}^{\Pi}} \right) \quad (2.16)$$

при  $n = 1$ ,

$$I_{\epsilon_i} = \left( x^m - \frac{1}{K_i^m} \frac{(\epsilon_i O_m)}{[\epsilon_i]} \right) / \left( \frac{x^m}{I_{\epsilon_i}^{\Pi}} + \frac{(\epsilon_i O_m)}{K_i^m [\epsilon_i] \cdot I_{\epsilon_i O_m}^{\Pi}} \right) \quad (2.17)$$

при  $n = 2$ ,

$$I_{\epsilon_i} = I_{\epsilon_i}^{\Pi} \left[ 1 + b_i \frac{I_{\epsilon_i}^{\Pi}}{I_{\epsilon_i 2 O_m}^{\Pi}} - \sqrt{\left( 1 + b_i \frac{I_{\epsilon_i}^{\Pi}}{I_{\epsilon_i 2 O_m}^{\Pi}} \right)^2 - 1 + b_i} \right] \quad (2.18)$$

$$\text{де } b_i = \frac{(\epsilon_{i2} O_m)}{K_i^m \cdot x^m [\epsilon_i]^2}$$

Граничні дифузійні потоки компонентів на межі метал-шлак

$$I_i^{\Pi} = k_D C_i = \beta D_i^{0,5} \rho c_i / 100 M_i \quad (2.19)$$

де  $\beta = 0,5 \div 2$  - конвективна постійна, однакова для всіх реагентів,  $c^{-1/2}$ , прийнято  $\beta = 1,2$  [6];  $D$  - коефіцієнти дифузії компонентів в розплаві,  $m^2/c$ ;  $\rho$  - щільність металу або шлаку,  $г/см^3$ ;  $M_i$  - молекулярна маса компонентів,  $г/моль$ .

Після визначення  $x$  і, відповідно, дифузійних потоків на кордоні метал-шлак (для  $FeO$  -  $I_{FeO}$ , для компонентів -  $I_{\epsilon_i}$ ). Можна розрахувати вміст оксидів і елементів в краплі після процесів на етапі в фронтальній частині.

Оксиди в шлаку:

$$\left( m_{(\epsilon_k O_m)}^{n+1} \right)_i = \left( m_{(\epsilon_k O_m)}^n \right)_i + I_{\epsilon_i} \cdot \left( M_{\epsilon_k O_m} \right)_i \cdot f \cdot (1 - L) \cdot \Delta \tau \quad (2.20)$$

$FeO$  в шлаку:

$$m_{(FeO)}^{n+1} = m_{(FeO)}^n - I_{FeO} \cdot M_{FeO} \cdot f \cdot (1 - L) \cdot \Delta \tau \quad (2.21)$$

Елементи в каплі:

$$\left( m_{\epsilon}^{n+1} \right)_i = \left( m_{\epsilon}^n \right)_i - I_{\epsilon_i} \cdot f \cdot (1 - L) \cdot \Delta \tau \quad (2.22)$$

Кисню в каплі:

$$m_O^{n+1} = m_O^n + I_O \cdot M_O \cdot f \cdot (1 - L) \cdot \Delta \tau \quad (2.23)$$

Маса шлаку:

$$m_{ш}^{n+1} = m_{ш}^n - I_{FeO} \cdot M_{FeO} \cdot f \cdot (1 - L) \cdot \Delta \tau + \sum \left( I_{\epsilon_i} \left( M_{\epsilon_k O_m} \right)_i \cdot f \cdot (1 - L) \cdot \Delta \tau \right)$$

Маса частки:

$$m_{Me}^{n+1} = m_{Me}^n + I_O \cdot M_O \cdot f \cdot (1 - L) \cdot \Delta\tau - \sum \left( I_{\epsilon_i} (M_{\epsilon_i})_i \cdot f \cdot (1 - L) \cdot \Delta\tau \right) \quad (2.25)$$

Концентрація компонентів шлаку:

$$(FeO) = m_{(FeO)}^{n+1} \cdot 100 / (m_{ш}^{n+1}) \quad (2.26)$$

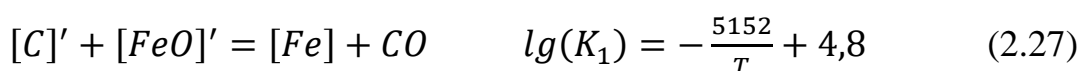
У разі використання порошкових дротів для дугової металізації дану модель необхідно доповнити з урахуванням зміни системи легування дротів і процесів тепломасопереносу на їх торці.

### 2.3 Модель надходження кисню в порошковий метал при дуговій металізації

Для аналізу залежності властивостей покриттів від складу порошкового матеріалу використовувалися розрахунки по моделі окислення частинок при дуговій металізації (ДМ) порошкового дроту (ПП) 20X11P5Ю3СІ системи легування Fe-Cr-V-Al-Y. Додатково через використання ПП змінюються теплові поля на торці [6, 7, 9]. Для ПП з урахуванням коефіцієнта заповнення 30% прийняли середню температуру на торці ПП 2100 К, в зоні горіння дуги - 2500 К, діалогове вікно програми oxidat10 з параметрами розрахунку (розділ Const програми) наведено в додатку В.

Для досліджуваного набору компонентів вихідних ПП в модель надходження кисню в порошковий метал при ДМ [6, 7, 9] додатково внесли такі зміни. При описі процесів надходження кисню в краплю і утворення шлаку щільність розплавленого металу при температурах 2000-2500 К взяли рівній  $6,2 \text{ г/см}^3 \sim (6200 \text{ кг/м}^3)$ , Щільність шлаку -  $5,5 \text{ г/см}^3 \sim (5500 \text{ кг/м}^3)$  [6, 7, 9].

Прийнято також, що взаємодія металу і шлаку на кордоні розділу описується комплексом реакцій окислення домішок із загальним реагентом  $FeO$ :



$$(FeO)' = [Fe]' + [O]' \quad \lg(K_2) = -\frac{6320}{T} + 2,732 \quad (2.28)$$

$$\frac{2}{3}(Cr)' + [FeO]' = [Fe]' + \frac{1}{3}(Cr_2O_3)' \quad \lg(K_3) = -\frac{5800}{T} - 3,1 \quad (2.29)$$

$$\frac{2}{3}(Al)' + [FeO]' = [Fe]' + \frac{1}{3}(Al_2O_3)' \quad \lg(K_4) = -\frac{16816}{T} - 3,016 \quad (2.30)$$

$$\frac{1}{3}(Si)' + [FeO]' = [Fe]' + \frac{1}{2}(SiO_3)' \quad \lg(K_5) = -\frac{7825}{T} - 3,06 \quad (2.31)$$

$$\frac{2}{3}(B)' + [FeO]' = [Fe]' + \frac{1}{3}(B_2O_3)' \quad \lg(K_6) = \frac{8025}{T} - 2,266 \quad (2.32)$$

$$\frac{1}{3}(Y_2S_3)' + [FeO]' = [Fe]' + [S]' + \frac{1}{3}(Y_2O_3)' \quad \lg(K_7) = -\frac{19307}{T} + 7,186$$

Константи рівноваги реакцій (2.33) і (2.33) знайдені розрахунковим шляхом по методу комбінування рівнянь хімічних реакцій [6, 7, 9]:

$$\frac{2}{3}B + O = \frac{1}{3}B_2O_3 \quad \lg(K_{10}) = \frac{14345}{T} - 5 \quad (2.34)$$

$$Fe + O = FeO \quad \lg(K_2) = \frac{6320}{T} - 2,734 \quad (2.35)$$

$$\frac{2}{3}B + FeO = Fe + \frac{1}{3}B_2O_3 \quad \lg(K_6) = \frac{8025}{T} - 2,266 \quad (2.36)$$

$$\frac{2}{3}[Y]' + [O]' = \frac{1}{3}(Y_2O_3)' \quad \lg(K_8) = \frac{-31217}{T} - 11,5 \quad (2.37)$$

$$\frac{2}{3}[Y]' + [S]' = \frac{1}{3}(Y_2S_3)' \quad \lg(K_9) = \frac{-5590}{T} - 1,58 \quad (2.38)$$

$$(FeO)' = [Fe]' + [O]' \quad \lg(K_2) = \frac{-6320}{T} - 2,734 \quad (2.39)$$

$$\frac{1}{3}(Y_2S_3)' + (FeO)' = [Fe]' + [S]' + \frac{1}{3}(Y_2O_3)'$$

$$\lg(K_7) = -\frac{31947}{T} + 12,654 \quad (2.40)$$

Константи рівноваги реакцій (2.34), (2.37) і (2.38) прийняті за даними [15, 17]. З умови, що перебіг кожної реакції супроводжується споживанням певної кількості  $FeO$ , сумарний дифузійний потік компонентів дорівнює дифузійному потоку  $FeO$

$$I_{FeO} - I_C - I_O - \frac{3}{2}I_{Cr} - \frac{3}{2}I_{Al} - 2I_{Si} - 3I_S - \frac{3}{2}I_B = 0 \quad (2.41)$$

тоді для даних компонентів

$$\begin{aligned}
& I_{FeO}^{\Pi} \left( 1 - \frac{x}{(FeO)} \right) - I_C^{\Pi} \left( 1 - \frac{x}{K_1[C]x} \right) - I_O^{\Pi} \left( \frac{K_2x}{[O]} - 1 \right) \\
& - \frac{3}{2} I_{[Cr]}^{\Pi} \left[ 1 + b_{Cr} \frac{I_{[Cr]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{[Cr_2O_2]}^{\Pi}} - \sqrt{\left( 1 + b_{Cr} \frac{I_{[Cr]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{[Cr_2O_3]}^{\Pi}} \right)^2} \right] - \\
& - \frac{3}{2} I_{[Al]}^{\Pi} \left[ 1 + b_{Al} \frac{I_{[Al]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{[Al_2O_3]}^{\Pi}} - \sqrt{\left( 1 + b_{Al} \frac{I_{[Al]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{[Al_2O_3]}^{\Pi}} \right)^2 - 1 + b_{Al}} \right] - \\
& - 2 \frac{x^2 K_5^2 [Si] - (SiO_2)}{x^2 K_5^2 [Si] / I_{[Si]}^{\Pi} + (SiO_2) / I_{[SiO_2]}^{\Pi}} - \\
& - 3 I_{[S]}^{\Pi} \left[ 1 + b_{Al} \frac{I_{[S]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{[S]}^{\Pi}} - \sqrt{\left( 1 + b_S \frac{I_{[S]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{[S]}^{\Pi}} \right)^2 - 1 + b_S} \right] - \\
& - 3 I_B^{\Pi} \left[ 1 + b_B \frac{I_B^{\Pi}}{4 \cdot I_{[B_2O_3]}^{\Pi}} - \sqrt{\left( 1 + b_B \frac{I_B^{\Pi}}{4 \cdot I_{[B_2O_3]}^{\Pi}} \right)^2 - 1 + b_B} \right]; \quad (2.36)
\end{aligned}$$

$$\text{де } x = \frac{[FeO]'}{[Fe]'} = \frac{1}{K_i} \frac{(\epsilon_{inO_m})^{1/m} \cdot (1 + I_{\epsilon_{inO_m}} / I_{\epsilon_{inO_m}}^{\Pi})^{1/m}}{[\epsilon_i]^{n/m} \cdot (1 - I_{\epsilon_i} / I_{\epsilon_i}^{\Pi})^{1/m}}$$

$$\begin{aligned}
b_{Cr} &= \frac{(Cr_2O_3)}{K_3^3 \cdot x^3 \cdot [Cr]^2}, \quad b_{Al} = \frac{(Al_2O_3)}{K_4^3 \cdot x^3 \cdot [Al]^2}, \quad b_S = \frac{(S)}{K_6^3 \cdot x^3 \cdot [S]^2}, \\
b_B &= \frac{(B_2O_3)}{K_7^3 \cdot x^3 \cdot [B]^2}
\end{aligned}$$

При визначенні граничних дифузійних потоків компонентів на кордоні метал-шлак взяли  $\beta = 1,2$  [7, 15, 25] - конвективну постійну, однакову для всіх реагентів,  $C^{1/2}$ ; коефіцієнти дифузії компонентів в розплаві,  $m^2/c$ , прийняті відповідно до [7]:  $[C] = 5,4 \cdot 10^5$ ,  $[O] = 12,2 \cdot 10^5$ ,  $[Cr] = 3,3 \cdot 10^5$ ,  $[Al] = 1,55 \cdot 10^5$ ,  $[Si] = 2,5 \cdot 10^5$ ,  $[B] = 1 \cdot 10^5$ ,  $[Y] = 1 \cdot 10^5$ . Склад шлаку прийнятий згідно [15], мас. %:  $(FeO) = 5$ ;  $(Cr_2O_3) = 5$ ;  $(Al_2O_3) = 20$ ;  $(SiO_2) = 10$ ;  $(B_2O_3) = 10$ ;  $(Y_2O_3) = 50$ . Коефіцієнти дифузії компонентів

шлаку  $(FeO) = 1 \cdot 10^{-5}$ ;  $(SiO_2) = 1 \cdot 10^{-6}$  [15], для  $(Cr_2O_3) = 2 \cdot 10^{-4}$  [15],  $(Al_2O_3) = 2 \cdot 10^{-3}$  [25],  $(B_2O_3) = 1 \cdot 10^{-6}$  [15],  $(Y_2O_3) = 1 \cdot 10^{-6}$  [25].

Після визначення  $x_i$ , відповідно, дифузійних потоків на кордоні метал-шлак (для  $FeO - I_{FeO}$ , для компонентів -  $I_{\epsilon_i}$ ). Розраховували вміст оксидів і елементів в краплі після процесів на етапі у фронтальній частині, при різних значеннях частки поверхні, вільної від шлаку,  $L = 0,2 - 0,5$ .

Загальна кількість кисню  $m_O$ , що надійшов в краплю і-й фракції, визначали як суму кисню, розчиненого в рідкому металі і що знаходиться в шлаку:

$$m_O = m_{Me} \frac{[O]}{100} + m_{ш} \left( \frac{(FeO)M_O}{100M_{TiO_2}} + \frac{(Cr_2O_3)M_O}{100M_{Cr_2O_3}} + \frac{(Al_2O_3)M_O}{100M_{Al_2O_3}} + \frac{(SiO_2)M_O}{100M_{SiO_2}} + \frac{(B_2O_3)M_O}{100M_{TiO_2}} + \frac{(Y_2O_3)M_O}{100M_{Y_2O_3}} \right) \quad (2.37)$$

Ступінь окислення частинок в даній фракції  $r_i$  складе:

$$r_i = (m_O \cdot 100)(m_{Me} + m_{ш})^{-1} \quad (2.38)$$

Загальний ступінь окислення  $R$  визначений згідно з розподілом крапель по масовій частці:

$$R = (\sum(r_i \cdot dm_i)) \cdot 100 \quad (2.39)$$

Розподіл часток по фракціям і масовим часткам прийнято згідно результатами гранулометричного аналізу [7, 15, 25].

## 3 ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ І ВИПРОБУВАНЬ

### 3.1 Програма експериментальних досліджень

Програма експериментальних досліджень включає в себе ряд завдань, вирішення яких необхідне для досягнення поставленої мети:

1. Вибір системи легування ПП і визначення режимів ДМ покриттів на основі теоретичних досліджень.
2. Отримання зразків покриттів з ПП обраної системи легування на встановлених режимах ДМ.
3. Проведення експериментальних досліджень фізико-механічних і експлуатаційних властивостей покриттів.
4. Проведення експлуатаційних досліджень робочих органів з зносостійкими покриттями в реальних умовах.

### 3.2 Устаткування і матеріали для нанесення покриттів

Як устаткування для напилення застосовувалася установка активної дугової металізації АДМ-10, призначена для нанесення зносостійких і антикорозійних покриттів з дротяних матеріалів способом термічного напилення. Технічні характеристики і комплект установки наведені в додатку Б і Г відповідно. Установка призначена для експлуатації в умовах, на які розраховані вироби виконання У, категорії 3, відповідно до ГОСТ 15150-69.

Живлення установки здійснюється від трьохфазної мережі змінного струму напругою 380/220 В, частотою 50 Гц. Для роботи установки необхідна наявність мереж підведення стисненого повітря, пропану, а також зварювального джерела харчування з жорсткою характеристикою ВДУ-506.

В основі роботи установки лежить процес плавлення дротів електричною дугою і розпорошення розплавленого металу високошвидкісним струменем транспортного газу. Сутність цього процесу

полягає в тому, що на два дроти, які виконують роль електродів, подається напруга. Дроти з постійною швидкістю надходять в розпилювальну головку металізатора, де в результаті зближення між ними виникає електрична дуга і відбувається плавлення. Транспортний газ (стиснене повітря і пропан) здуває частки розплавленого металу з торців дротів, підхоплює їх, розганяє до високої швидкості і забезпечує доставку до поверхні оброблюваної деталі.

Для роботи установки потрібне підведення стисненого повітря, пропану, напруги від зварювального джерела живлення. Металізатор складається з наступних основних частин (рисунок 3.1): черв'ячного редуктора І, до корпусу якого кріпляться електродвигун 1 з циліндричним редуктором; кронштейн механізму притискання роликів 2; важелі 3; передні і задні направляючі 4; піддон картера 5, на якому через ізолятор розміщені струмопроводи 6; ручка 7; розпилювальна головка 8; плита 9; подавальні ролики 10; кран 11; притискні ролики 12; пружини 13; гайки 14; важелі 15.

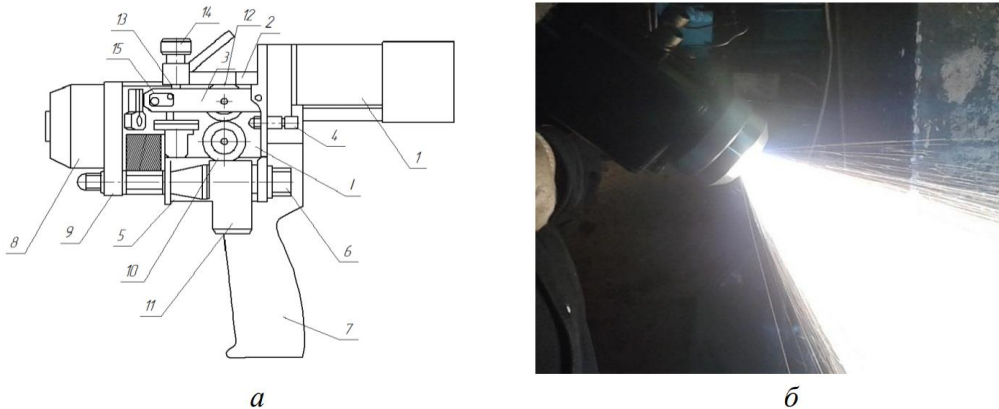


Рисунок 3.1 - - Загальний вигляд металізатора: а - пристрій металізатора; б - установка в роботі.

Для зменшення ваги і габаритів апарату струмопроводи 6 виконані в вигляді трубок для подачі стисненого повітря для утворення транспортного потоку і одночасно охолодження деталей металізатора. До піддону прикріплений кронштейн, на який надівається ручка 7 або з допомогою якого Металізатор може кріпитися, наприклад, до супорта верстата.



Розпилювальна головка металізатора 8 розташована на проміжній розподільчій плиті (панелі) 9, закріпленої на струмопроводах 6 піддону картера.

Черв'ячний редуктор I служить для передачі обертання від валу електродвигуна 1 до подавальних роликів 10 металізатора. На корпусі редуктора кріпиться більшість деталей металізатора.

Розпилювальна головка 8 служить для формування струменя розплавленого металу. Складається з корпусу, соплової направляючої частини і струмопідвідного вузла. Стисле повітря подається в соплову частину, через проміжну розподільну плиту, по лівому і правому струмопроводах піддону.

Притиснення дротів до подавальних роликів здійснюється притискними роликками 12, розташованими в пазах притискних важелів. Осі обертання притискних роликів ізольовані від важеля текстолітовими втулками. Притиснення роликів забезпечується пружинами 13, а зусилля притиснення регулюється гайками 14, розташованими на кронштейні механізму притиску. Для зменшення ковзання дроту притискні ролики мають зубчастий вінець і за допомогою додаткових шестерень отримують примусове, синхронне з подаючими роликками обертання. Віджимання важелів здійснюється поворотом важелів 15 з ексцентриками.

Для роботи з установкою необхідно мати наступне допоміжне обладнання: касети з електродним дротом, пристрій для установки касет, що виключає можливість торкання дротів при розмотування щоб уникнути короткого замикання, мережа стисненого повітря, мережа (балон) пропану.

Перед початком роботи необхідно перевірити затягування всіх різьбових з'єднань. На ділянці нанесення покриттів слід встановити металізатор в робоче положення і закріпити, під'єднати газовий блок до мережі стисненого повітря, до металізатора і пульта управління. Після цього потрібно встановити в зручному для роботи місці джерело струму «ВДУ-506» на відстані 3-4 м від металізатора і підготувати його до роботи. Потім

необхідно з'єднати металізатор, газовий блок, пульт управління і джерело струму між собою і підключити до контуру захисного заземлення. Також необхідно перевірити надійність з'єднання трубопроводів і відсутність пошкоджень рукавів, кабелів і провідників. Наявність витоків газів неприпустиме.

Як матеріали для нанесення досліджуваних покриттів були використані: суцільна дрот (СП) марки 20X13 системи легування FeC-Cr і порошкові дроту (ПД) базової системи легування Fe-Cr-B різних марок: 60X13P5CI системи легування Fe-Cr-B-C-Y; 20X11P5C5I системи легування Fe-Cr-B-Si-Y; 20X11P5Ю3CI системи легування Fe-CrB-Al-Y діаметром 2,0 мм (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1

Розрахунковий хімічний склад використовуваних дротів.

Марка проволоки	Масова доля елементів, %						
	C	Cr	B	Al	Si	Y	Fe
СП 20X13	0,16-0,25	12-14	-	-	До 0,6	-	Основна
ПП 60X1335CI	0,6	13	5	0,2	1	1	Основна
ПП 20X11P5C5I	0,2	11	5	0,2	4,5	1	Основна
ПП 20X11P5Ю3CI	0,2	11	5	3	1	1	Основна

Напилення покриттів товщиною 2 мм проводилось на поверхню пластин, виготовлених зі сталі 20 по ГОСТ 1050-88. Підготовку поверхні зразків під напилення покриттів здійснювали відповідно до ГОСТ 9.304.

Поверхня пластин перед напиленням була знежирена ацетоном по ГОСТ 2768-84, продування стисненим повітрям і струменевою-абразивною обробкою. Роботи з підготовки поверхні під напилення проводили при температурі повітря не нижче плюс 5 °С з метою виключення конденсації вологи на зразках. САО виробляли пістолетом інжекторного типу з діаметром сопла 8 мм при робочому тиску стисненого повітря (5-й клас з ГОСТ 17433-80) 0,5-0,6 МПа і його витраті 174-216 м<sup>3</sup>/год. Як абразив застосовували чавунну колоту дріб марки ДЧК 2,0 по ГОСТ 11964-81 при її

витраті 0,05-1,2 кг/с. Кут нахилу струменя абразиву до поверхні зразка -  $90 \pm 10^\circ$ . Відстань від сопла до поверхні деталі варіюється в межах 100-150 мм. Шорсткість поверхні після САО допускали не нижче Ra 12,5, контролювали за допомогою набору зразків шорсткості поверхні порівняння (ОШС) по сталі - дробоструйна обробка (ДС) з ГОСТ 9378, ступінь очищення 1 по ГОСТ 9.402.

Покриття наносили не пізніше 2 годин після САО за допомогою установки активованої дугового металізації АДМ-10.

Зразки для досліджень були вирізані на електроерозійному верстаті AGIE CHARMILLES CUT 20 з пластин з напиленням АДМ-покриттям.

Підготовка мікро - і макрошліфів зразків для досліджень структури, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей зразків покриттів здійснювалася з використанням азотної кислоти ( $\text{HNO}_3$ ) - ГОСТ 4461-77, етилового технічного спирту ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) - ГОСТ 18300-87, дистильованої води ( $\text{H}_2\text{O}$ ) - ГОСТ 6709, пасти ГОІ № 2 (ТУ 6-18-36) і алмазної пасти НОМ 60/40 (ГОСТ 25593).

### 3.3 Оптимізація параметрів процесу напилення методом планування експерименту

При розпилюванні ПП на типових режимах відбувається вигорання легуючих елементів і насичення розпорошується металу киснем з атмосфери. Різноманітність і складний характер взаємозв'язку параметрів, що визначають можливість отримання якісних покриттів, роблять доцільним застосування методу планування експерименту [27-28]. За допомогою методу планування експерименту можна досліджувати вплив технологічних параметрів АДМ на властивості металізаційних покриттів з ПП і виконувати їх оптимізацію. При цьому використовується лінійна математична модель:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (3.1)$$

де  $\hat{y}$  – змінна стану;  $b_i$  – коефіцієнт регресії;  $x_i$  – фактори.

Коефіцієнти регресії розраховують за формулою

$$b_i = (1/N) \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u \quad (i = 0, 1, \dots, n) \quad (3.2)$$

де  $N$  – число дослідів;  $y_u$  – змінні стану;  $n$  – число факторів. Вільний член рівняння регресії:

$$b_0 = (1/N) \sum_{u=1}^N y_u \quad (3.3)$$

Розрахунок порядкової дисперсії проводять за формулою

$$S_u^2 = (1/m - 1) \sum_{k=1}^m (y_{uk} - \bar{y}_u)^2 \quad (3.4)$$

де  $y_{uk}$  - змінна стану (в паралельних дослідях);  $m$  - число паралельних дослідів.

Для перевірки однорідності дисперсії використовується критерій Кохрена, його розрахункове значення визначають з виразу

$$G_p = S_{u \max}^2 / \sum_{u=1}^N S_u^2 \quad (3.5)$$

де  $S_u$  - максимальна з розрахованих порядкової дисперсій. При виконанні умови

$$G_p < G_T \quad (3.6)$$

гіпотеза про однорідність дисперсій приймається ( $G_T$  - табличне значення критерію Кохрена для чисел ступенів свободи  $i$  і  $i$  рівня значущості  $q$ ). У технічних розрахунках приймається 5% -вий рівень значимості.

Якщо умова виконана, то порядкові дисперсії зводять до середнього значення з метою отримання похибки дослідів:

$$S_0^2 = (1/N) \sum_{u=1}^N S_u \quad (3.8)$$

Наступним етапом побудови моделі є перевірка значущості коефіцієнтів рівняння регресії. Для цього спочатку розраховують дисперсії коефіцієнтів регресії:

$$S_{b_i}^2 = S_0^2 / N \quad (3.9)$$

Значимість коефіцієнтів оцінюють, порівнюючи абсолютні значення коефіцієнта і довірчого інтервалу:

$$|b_i| > |\Delta b_i| \quad (3.9)$$

$$\Delta b_i = \pm t_T S_{b_i} \quad (3.10)$$

$t_T$  - табличне значення критерію Стьюдента, яке знаходять за кількістю ступенів  $f_0 = N(m - 1)$  свободи і рівнем значущості  $q$ ;  $S_{b_i}$  - середньоквадратичне відхилення  $b_i$ .

Якщо умова виконана, то коефіцієнт визнається значущим.

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії використовується критерій Фішера:

$$F_p = S_{ад}^2 / S_0^2 \quad (3.11)$$

$$S_{ад}^2 = (m / (N - n - 1)) \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \bar{y})^2 \quad (3.12)$$

Якщо виконується умова

$$F_p < F_T \quad (3.13)$$

то лінійне рівняння регресії визнається адекватним. Табличне значення критерію Фішера  $F_T$  вибирається для чисел ступенів свободи  $f_1 = N - n - 1$  і  $f_2 = N(m - 1)$ .

Отримане рівняння використовується для наступних етапів планування, зокрема, для пошуку оптимальних режимів методом крутого сходження по градієнту.

Фактор, для якого множення коефіцієнта регресії на інтервал варіювання максимально, визнається базовим:

$$\max(b_i \Delta x_i) = a \quad (3.14)$$

Потім для базового факторе вибирають крок крутого сходження і розраховують інші складові градієнта по формулі

$$h_i = (b_i \Delta x_i) h_a a \quad (3.15)$$

Пошук оптимальних значень вихідного параметра проводять послідовним збільшенням складових градієнта до нульового рівня факторів, переводячи їх в кодовану форму за рівнянням

$$x_i = (x_i - x_{i0}) / \Delta x_i \quad (3.16)$$

Для оптимізації режимів дугової металізації використовували чотирьох факторний експеримент для лінійної моделі у вигляді напіврепліки  $2^{4-1}$  по критеріям ортогональності і рототабельності [27-28]. В якості

критерію оптимізації використовували характеристику міцності зчеплення нанесеного покриття з основою як визначальну стійкість покриттів в умовах ударно-абразивного зношування. Фактори і інтервали їх варіювання наведені в таблиці 3.2, відповідають типовим значенням для ДМ [7], умови проведення експериментів представлені в таблиці 3.3. Як фіксованих параметрів АДМ прийняті тиск повітря і пропану, відповідно 0,42 і 0,40 МПа, швидкість переміщення пістолета щодо напилюваної поверхні - 0,1 м/с [9]. Інші параметри металізації не включені в розгляд на основі аналізу літературних даних [6, 7, 15, 25].

Таблиця 3.2

План експерименту.

Фактор	Назва	Позначення	Рівні		Інтервал
			Нижній	Верхній	
$x_1$	Струм дуги, А	$I$	200	300	50
$x_2$	Напруга дуги, В	$U$	34	42	4
$x_3$	Товщина покриття, мм	$T$	0,2	0,6	0,2
$x_4$	Дистанція, мм	$S$	100	150	25

Таблиця 3.3

Умови проведення дослідів для покриттів з ПП.

№	Фактори експерименту			
	$x_1$ , А	$x_2$ , В	$x_3$ , мм	$x_4$ , мм
1	200	34	0,2	100
2	300	34	0,6	100
3	200	34	0,6	150
4	200	42	0,2	150
5	300	42	0,2	100
6	300	34	0,2	150
7	200	42	0,6	100
8	300	42	0,6	150

Обробку експериментальних даних здійснювали за допомогою інструменту MatchLab та MatchCad 14.

Таким чином, планування експерименту дозволить дослідити вплив технологічних параметрів активованої дугової металізації (АДМ) на адгезійну міцність покриттів з подальшою їхньою оптимізацією для отримання якісних зносостійких покриттів стійких до ударно-абразивного зносу під час обробки ґрунтів.

### 3.4. Методика експериментальних досліджень

Призначення мікроструктурного аналізу композиції «покриття – основний метал» полягає у встановленні зв'язку між умовами напилення, хімічним складом вихідних матеріалів, особливостями мікроструктури і експлуатаційними характеристиками. Мікроаналіз дозволяє визначити особливості мікроструктури покриття, основного металу і перехідної зони, а також провести якісний і кількісний аналізи їх фазового складу.

Для дослідження структури, фазового складу і виконання мікрохімічного аналізу використовували зразки покриттів, напилені на пластини 20×20×1,5 мм зі сталі 20. Із зазначених зразків готували поперечні металографічні шліфи з використанням пасти ГОІ № 2 і алмазної пасти НОМ 60/40 на полірувальному верстаті. Для травлення шліфів використовували тривідсотковий розчин азотної кислоти в спирті.

Так як у нас відсутня можливість визначити фазовий склад покриття через відсутність необхідного обладнання, даний вид дослідження не проводили. Структуру покриттів вивчали на електронному мікроскопі G1200 С з роздільною здатністю 1х1200, що має можливість підключення до персонального комп'ютера.

Пористість покриттів визначали металографічним методом на поперечних шліфах за допомогою вище описаного мікроскопа та комп'ютерних зображень мікрошліфів, оцінку розподілу пор покриття за

розмірами, площі і об'єму:  $n$  - чисельна частка пор,  $A$  - частка по площі,  $V$  - частка за обсягом. Об'єм пори обчислювали як  $V = \frac{\pi D^3}{6D} = \sqrt{4A/\pi}$  - діаметр кола, визначеного через масштабний коефіцієнт електронного зображення, результати визначення пористості усереднювати для п'яти полів зору відповідно.

Визначити адгезійну міцність також в наших умовах не є можливим.

Мікротвердість з поверхні металізованих покриттів і по їх перерізу вимірювали згідно ГОСТ 9450 на Мікротвердомірі Leica VMHT AUTO при навантаженні 300 г, індентором служила алмазна піраміда з кутом між протилежними гранями 136 °.

Зносостійкість визначали при терті по закріпленій частці абразиву за методикою Хрущова М.М. і Бабічева М.А. [85]. Досліджували зразки з розмірами 10×10 мм шляхом здійснення зворотно-поступальних рухів по шліфувальному папері 14A32МН481 по ГОСТ 6456 на основі електрокорунду (Рисунок 3.2). Шлях тертя зразка за одне випробування при швидкості руху 0,158 м/с встановлювався рівним 60 м. Нормальне питоме навантаження на зразок 10 кг, питоме навантаження 1 МПа, величина поперечного зміщення шліфувального паперу на один подвійний хід зразка - 0,0012 м. Показник зносостійкості покриттів, рівний відношенню змін маси еталона і зразка, визначався за результатами трьох випробувань.

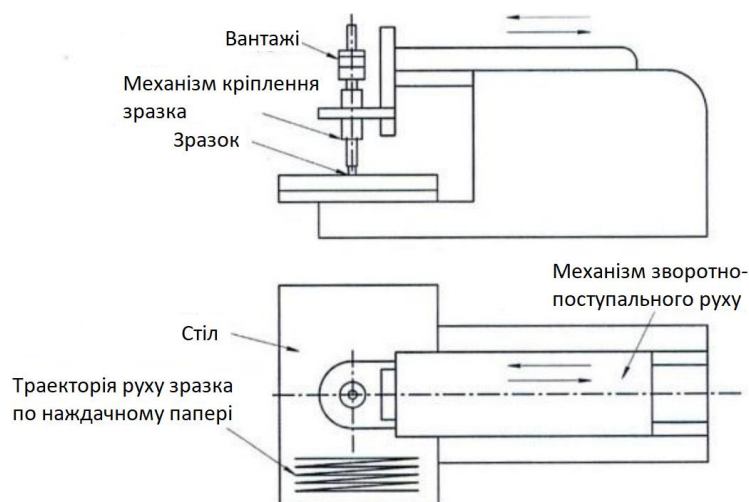


Рисунок 3.2 - Схема зношування по закріпленому абразиву.



В якості критерію зносостійкості використовували показник відносної зносостійкості:

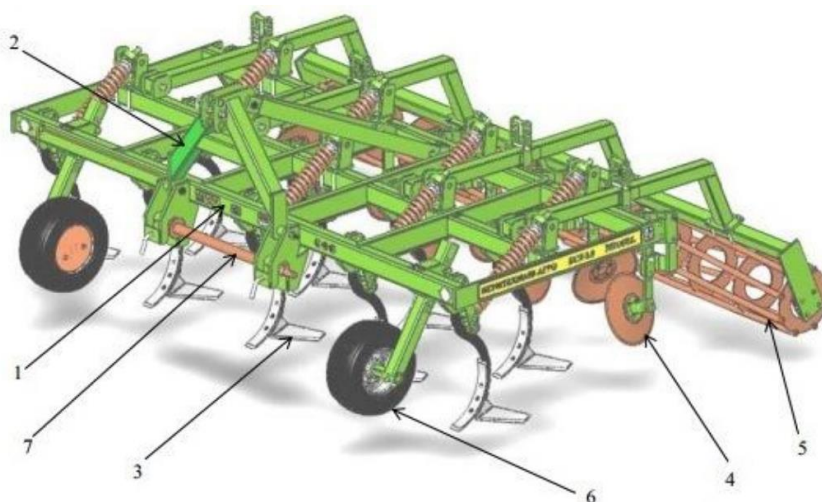
$$E = \Delta m_e / \Delta m_0 \quad (3.17)$$

де  $\Delta m_e, \Delta m_0$  – зміна маси еталону і зразка в процесі дослідження.

### 3.5 Методика експлуатаційних досліджень

При проведенні експлуатаційних досліджень в умовах виробничої експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин, були використані розпушуючі лапи (крилоподібний леміш і двостороннє долото) культиватора стерньового важкого (КСТ) виробництва фірми «Bellota», Іспанія (Рисунок 3.3), які були об'єктом дослідження. Експериментальні розпушуючі лапи були поставлені на культиватор КСТ-3,8 (рисунок 3.4), який агрегувався трактором ХТЗ-150К класу 3.

Культиватори сімейства КСТ-3,8 є навісними та являють собою рамну конструкцію з розміщеними на ній механізмами і вузлами. Вони складаються з несучої рами 1, навісного триточкового пристрою 2, дев'яти плоскоріжучих лап 3, восьми (десяти) сферичних дисків 4, прикочуючих опорних котків 5.



1 - несуча рама; 2 – триточковий навісний пристрій; 3 - плоскоріжуча лапа; 4 - сферичний диск; 5 - прикочуючі опорні катки; 6 - опорне регульоване по висоті, колесо; 7 - штанга швидкої зчіпки.

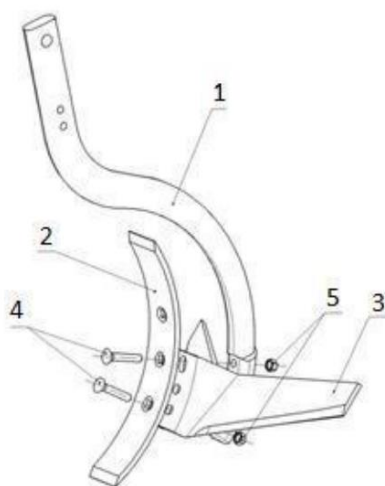
Рисунок 3.3 - Культиватор КСТ-3,8.

Для роботи з тракторами, які не мають систем автоматичного регулювання глибини обробки ґрунту, культиватор забезпечений опорними колесами 6, регульованими по висоті, які спільно з прикочуючими опорними катками, служать обмежувачами глибини ходу робочих органів.

Культиватор працює наступним чином: плоскоріжучі лапи крилоподібні форми розпушують оброблюваний шар ґрунту на встановлену глибину від 8 до 16 см; регульовані по глибині сферичні диски подрібнюють і перемішують рослинні залишки, добрива з верхнім шаром ґрунту, розрівнюють гребені утворені розпушуючими лапами; прикочуючі опорні котки підтримують необхідну глибину обробки, вирівнюють поверхню поля, накочують ґрунт, створюючи ущільнене ложе.

До робочих органам КСТ-3,8 відносяться плоскоріжучі лапи з лемішами крилоподібні форми, оснащені механізмами захисту від поломок; сферичні диски; прикочуючі опорні котки.

Лапи з лемішами крилоподібні форми (рисунок 3.4) складається з: стійки 1, леміша крилоподібні форми 3, долота 2. Долото 2 і леміш 3 кріпляться до стійки 1 лапи за допомогою двох лемішними гвинтів 4 (болтів) М12х70 з гайками 5 (М12 обтискна DIN 980).



А)



Б)

Рисунок 3.4 - Робочий орган культиватора (КСТ - 3,8):

А - схема; Б - зовнішній вигляд; 1 - стійка; 2 - долото; 3 - леміш крилоподібний; 4 - гвинт М12х70; 5 - гайка М12 обтискна DIN 980.

На КСТ-3,8 встановлюють пружинний механізм захисту лапи від поломки (Рисунок 3.5), який дозволяє використовувати ці моделі на ґрунтах засмічених камінням з фракцією не більше 120 мм.

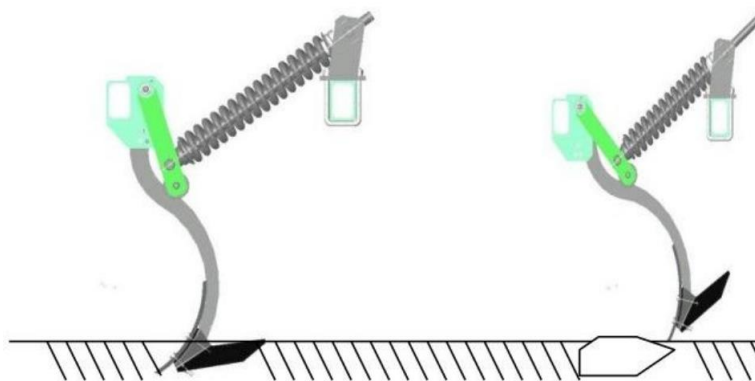


Рисунок 3.5 - Пружинний механізм захисту лапи від перевантажень.

При наїзді на камінь (перешкоду) лапа стискає пружину і відхиляється, оберігаючи робочі органи від поломок. Під дією сили пружини лапа повертається в зворотне положення.

Підготовка агрегату до роботи включала підготовку трактора, приєднання культиватора до трактора, попереднє регулювання культиватора і регулювання агрегату в полі [1].

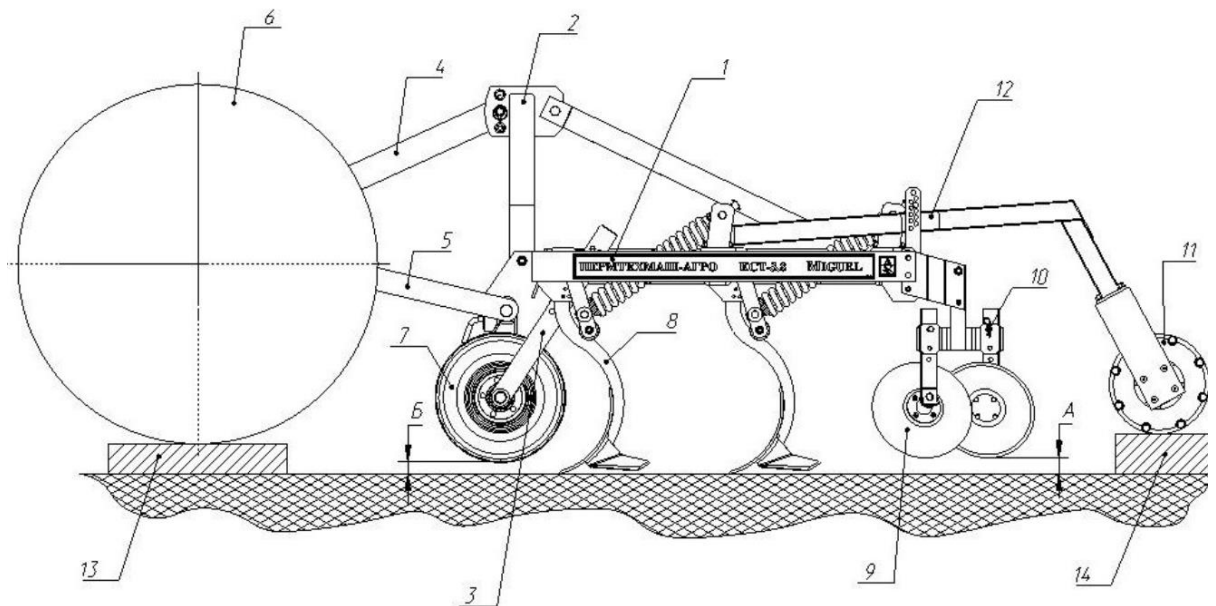
Попередню установку глибини обробітку ґрунту робочими органами - плоскоріжучими лапами з лемішами крилоподібної форми, сферичними дисками і прикочуючими опорними котками, проводили на рівній горизонтальній площадці з твердим покриттям в наступній послідовності (рисунок 3.6).

1. Під задні колеса трактора підкладали дерев'яні бруски 13 (Рисунок 3.6) товщиною 5-6 см (імітуючи продавлювання ґрунту колесами трактора під впливом ваги агрегату);

2. Опорні колеса культиватора вивішували на висоту «Б» до опорної поверхні (на 2-3 см менше необхідної глибини обробки « $h_p$ »);

3. Під прикочуючі котки 11 підкладали дерев'яні бруски 14 на 2-3 см тонше, ніж встановлена величина Б опорного колеса. Положення котка фіксується пальцем 12.

4. Сферичні диски налаштовували на розмір «А», рівний, приблизно, половині заданої глибини обробки « $h_p$ », при заданій глибині обробки 12-16 см.



1 - рама; 2 - кріплення центральної тяги; 3 - труба; 4,5 - центральна і нижня тяги трактора; 6 - заднє колесо трактора; 7 - опорні колеса; 8 - стійка; 9 - сферичні диски; 10 - палець; 11 - опорний коток; 12 - кронштейн; 13, 14 - дерев'яні бруски.

Рисунок 3.6 - Регулювання культиватора КСТ-3,8 і підготовка агрегату до роботи.

$$A \approx 0,5 \cdot h_p \quad (3.17)$$

і дещо глибше  $A \approx 0,8 \cdot h_p$ , при заданій глибині обробки 8-12 см.

Стійку диска фіксували в заданому положенні установкою пальця 10 в відповідні отвори на установчому кронштейні.

При такому положенні робочих органів і шляхом регулювання довжини верхньої тяги 4 механізму навішування трактора, рама займала при роботі горизонтальне положення.

Остаточне регулювання виконували в полі після пробного проходу (Рисунок 3.7), яка залежить від стану оброблюваної ґрунту і її вологості і механічних властивостей.



Рисунок 3.7 - Остаточне регулювання в полі після пробного проходу культиватора КСТ-3,8.

Рама культиватора при роботі займала горизонтальне положення, налаштування по висоті опорних коліс і опорних прикочуючих котків забезпечувала необхідну задану глибину обробки, сферичні диски розрівнювали гребені, утворені розпушуючими лапами, подрібнювали та перемішували рослинні залишки, добрива з верхнім шаром ґрунту, прикочуючі котки - вирівнювали поверхню поля, прикочуючи ґрунт, створюючи підповерхнєве ущільнене посівне ложе.

Параметри проведення експлуатаційних досліджень наступні: обробка середньо суглинистих ґрунтів при глибині 8-12 см. Вологість ґрунту за період досліджень варіювалася (15-28%). Її визначали вологоміром WALCOM AMT-300. Швидкість руху агрегату склала в середньому 7-9 км/год.

Для зміцнених робочих органів напрацювання склало 40 га, серійних - 25 га. Дослідження проводили на полях дослідного господарства в Іллінецькому районі Вінницької області, були підібрані ділянки полів з

рівною поверхнею і однаковим складом ґрунтів типовий для полів даного регіону.

Експлуатаційні дослідження проводили для зміцнених робочих органів з нанесеними метализаційними покриттями з порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ системи легування Fe-Cr-B-Al-Y. Одночасно з зміцненими деталями встановлювали серійні розпушуючі лапи, виготовлені зі сталі 28MnB5, сертифікат якості наведено в (додатку А). Розпушуючі лапи встановлювали за схемою (рисунок 3.8). Номер на схемі відповідає маркуванню робочого органу.

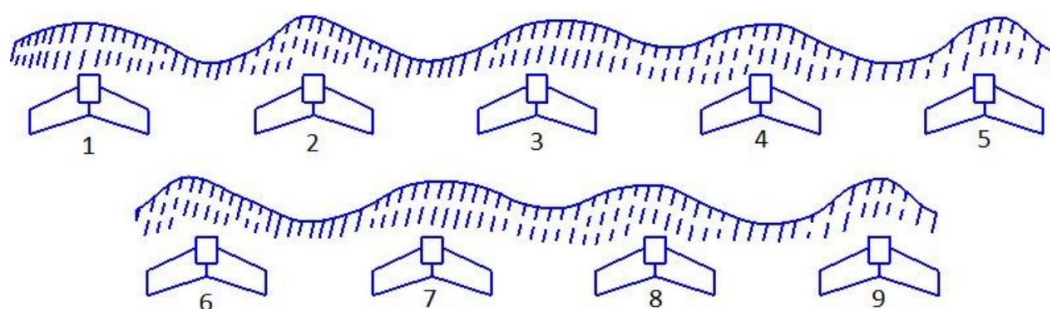


Рисунок 3.8 - Схема розстановки розпушуючих лап: 1, 3, 5, 7, 9 - зміцнена ПП 20X11P5Ю3СІ; 2, 4, 6, 8 - серійні розпушуючі лапи.

Параметром, що визначає поточний стан робочого органу, була втрата маси. Контроль зносу перевіряли з кроком 2 га до напрацювання 10 га, потім через 5 га до напрацювання 40 га, при цьому робочі органи знімали з машини і очищали від залишків ґрунту. Зважування виконували на вагах CASED-H-15 (Високий (II) клас точності) з похибкою вимірювання маси 0,5 г. Зносостійкість лап культиватора з нанесеними покриттями визначали відносним методом, прийнявши за 1,0 зносостійкість серійних.

Органолептичним методом оцінювали стан покриттів: відколи, тріщини, відшаровування, рівномірність зносу.



## 4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ І ВИПРОБУВАНЬ

### 4.1 Результати моделювання окислення частинок при дуговій металізації

Результати моделювання процесу окислення частинок розпилюваного металу при ДМ ПП і СП представлені в таблиці 4.1. Розрахункові значення потрапляють в інтервал дослідних даних для частки поверхні краплі, вільної від шлаку  $L = 0,2 - 0,3$ . Ймовірно, зазначений ефект обумовлений введенням в шихту ПП компонентів, що збільшують в'язкість шлаку, таких як алюміній і ітрії.

Частка  $L$  постійно змінюється в залежності від зміни швидкості, температури частинок по дистанції, їх можливого обертання. Якщо порівнювати отримані результати з даними для СП, то видно, що  $L$  змінюється також залежно від хімічного складу розпилюваного матеріалу. Далі в розрахунках прийнято, що показник  $L = 0,25$  який найбільш достовірно відображає фізичні процеси.

Таблиця 4.1

#### Результати моделювання.

Ступінь окислення R, %	СП 20X13	ПП 60X13P5СИ	ПП 20X11P5C5И	ПП 20X11P5Ю3СИ
Розрахункові дані $L = 0,2 - 0,3$	2,15-2,86	1,38-1,78	1,34-1,73	1,14-1,51
Розрахункові дані $L = 0,4 - 0,5$	3,67-4,51	2,07-2,25	1,99-2,18	1,93-2,36
Дослідні дані	2,4	1,54	1,49	1,27

З наведеної таблиці видно, що ступінь окислення АДМ-покриттів з ПП 20X11P5Ю3СІ в 1,89 рази нижче, ніж у АДМ-покриттів з СП 20X13. Ймовірно, отриманий результат обумовлений великою спорідненістю ітрію і алюмінію, введених до складу ПП, до кисню [7], що сприяє зниженню

ступеня окислення частинок розпилюваного матеріалу і поліпшенню умов взаємодії в контакті «частинка-підкладка». Відповідно, це може пояснювати відмінності у фізико-механічних і експлуатаційних властивостях покриттів з ПП різних систем легування. Мінімальний ступінь окислення покриттів з ПП 20X11P5Ю3СІ дозволить запобігти їх знос за механізмом внутрішнього тертя з виникненням і розвитком мікротріщин по оксидним плівкам. З урахуванням вищесказаного здійснено вибір системи легування ПП для ДМ зносостійких покриттів.

#### 4.2 Результати оптимізації режимів дугового металізації

Результати визначення режимів ДМ методом планування експерименту за критерієм максимальної адгезійної міцності покриттів з ПП 20X11P5Ю3СІ, що визначає їх здатність чинити опір відшаровуванню в умовах експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин, наведені в таблицях 4.2 і 4.3. Лінійне рівняння регресії адекватно експериментальними даними за критерієм Фішера для  $ss$ -числа ступенів свободи і заданого  $p$ -рівня значущості. Всі коефіцієнти рівняння регресії, крім визначального вплив напруги дуги, статистично значущі за  $t$ -критерієм Стьюдента для заданого  $p$ -рівня значущості.

Таблиця 4.2

Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів \*.

Фактори	Beta	$t$ (3)	$p - level$
$I, A$	0,54	8,83	0,003
$U, B$	0,08	1,35	0,267
$T, мм$	0,77	12,62	0,001
$S, мм$	-0,3	-5,02	0,015

\* Beta - коефіцієнт регресії;  $p$  - рівень значущості;  $t$  - Критерій Стьюдента.



Оцінка адекватності лінійної моделі \*

Factor	SS	сс	MS	F	p
I, A	89,64	1	89,04	78,04	0,003
U, B	2,12	1	2,12	1,84	0,267
T, мм	183,16	1	183,16	159,45	0,001
S, мм	28,95	1	28,95	25,20	0,015
Error	3,44	3	1,14		
Total SS	307,33				

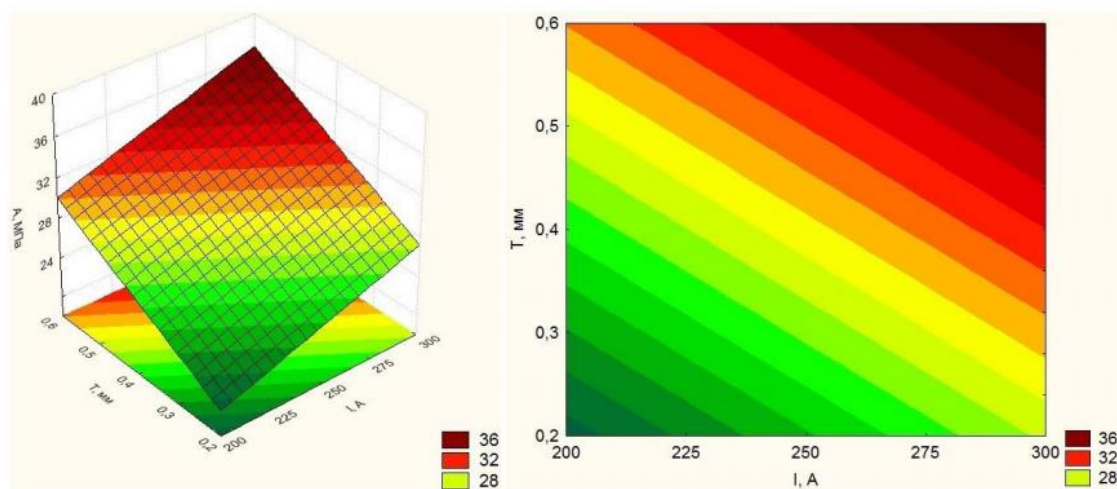
\* SS - сума квадратів; сс - ступінь свободи; MS - середнє квадратичне; F - критерій Фішера; p - рівень значущості.

Згідно з результатами регресійного аналізу залежність адгезійної міцності покриття від параметрів ДМ може бути оцінена за рівнянням:

$$y = 0,54x_1 + 0,77x_3 - 0,31x_4 \quad (4.1)$$

де  $x_1$  - струм дуги, А;  $x_3$  - товщина покриття, мм;  $x_4$  - дистанція напилювання, мм.

Інтерпретація отриманих результатів виконана за допомогою графіків поверхні і карт ліній рівня відгуку (малюнки 4.1 і 4.2).



а)

б)

Рисунок 4.1 - Графік поверхні (а) і карта лінії рівня відгуку (б) для факторів струму дуги і товщини покриття.

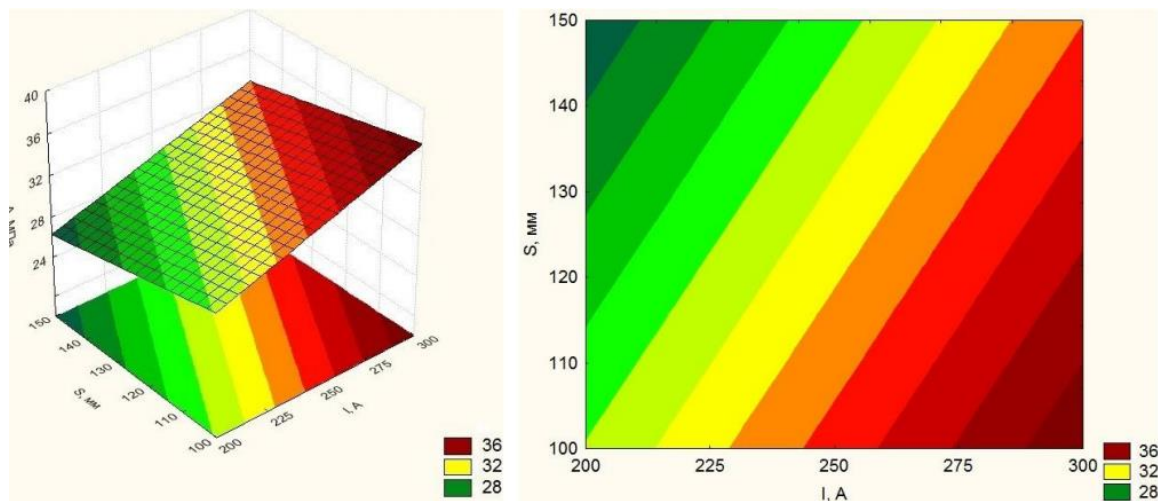


Рисунок 4.2 - Графік поверхні (а) і карта лінії рівня відгуку (б) для факторів струму дуги і дистанції напилювання.

Аналіз наведених даних дозволяє зробити висновок, що адгезія металізаційних покриттів зростає зі збільшенням їх товщини, струму дуги, а також зменшенням дистанції напилювання (в порядку зменшення ефекту чинників), вплив напруги дуги статистично значимий.

При ДМ збільшення струму дуги призводить до підвищення температури частинок, розвитку взаємодії в контакті «частинка-підкладка» і підвищенню адгезійної міцності покриття. Збільшення напруги дуги, незважаючи на підвищення температури частинок, призводить до зниження коефіцієнта використання металу (КІМ) частинок і його вигорання за рахунок збільшення довжини дуги [7], що, мабуть, обумовлює малий вплив цього фактора на адгезію металізаційного покриття. Отримані в даній роботі закономірності збігаються з даними інших авторів [6, 7, 15, 25]. При ДМ питома енергія, що витрачається на плавлення, перегрів і випаровування металу, з ростом потужності дуги збільшується, а отже, збільшується і температура розпилюються частинок. Збільшення температури розпилюються частинок в свою чергу призводить до підвищення міцності зчеплення, щільності і розвиненості поверхні одержуваних покриттів.

При виборі режиму слід прагнути до мінімальних значень напруги дуги без порушення стабільності процесу, а необхідну для перегріву

напилюваних частинок величину потужності встановлювати за допомогою зміни сили струму [7].

Для оптимізації технологічних параметрів ДМ за критерієм максимальної міцності напилюваних покриттів застосовували метод крутого сходження, таблиця 4.4 [7].

Таблиця 4.4

Оптимізація режимів ДМ методом крутого сходження.

Характеристика	Фактор		
	$x_1, A$	$x_3, мм$	$x_4, мм$
Нульовий рівень $x_{i0}$	300	0,6	100
Інтервал варіювання $\Delta x_i$	50	0,2	25
Коефіцієнт $b_i$	0,54	0,77	-0,30
Добуток $b_i \Delta x_i$	27	0,15	7,5
Крок $h_a$ при зміні базового фактору $x_i$ на 10	10	0,054	2,778
Округлення кроку варіювання	10	0,05	2,8
Змінна стану	Крутий ріст		
$\bar{y}$	310	0,65	97,2
36,97	310	0,65	97,2
42,76	320	0,7	94,4
31,18	330	0,75	91,6

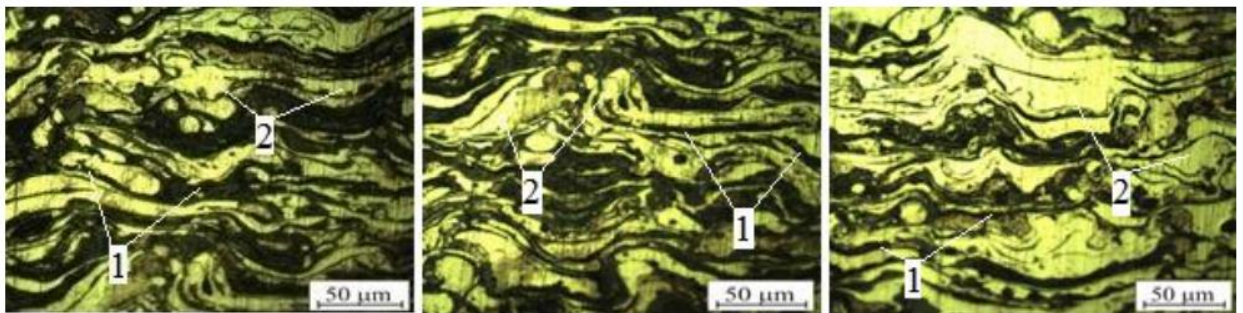
В результаті визначені оптимальні параметри ДМ покриттів з ПП 20X11P5Ю3СІ:  $I = 320 \pm 15 A$ ;  $U = 34 \pm 1,5 B$ ;  $S = 0,7 \pm 0,05 мм$ ;  $L = 95 \pm 5 мм$ , це металізаційне покриття виявилось найбільш зносостійким, тому можна констатувати, що воно і має найбільшу адгезійну міцність.

### 4.3 Результати експериментальних досліджень

Отримані металізаційні покриття (рисунок 4.3) мають характерну для методів газотермічного напилення ламелярно-пористу структуру, де світлі ділянки - металева основа, яка формується з крапель розплавленого металу, а

темні - прошарку оксидів, що утворюються при окисленні крапель на дистанції напилювання. Покриття відрізняються значною нерівномірним сплавом окремих напилених часток один з одним. Ймовірно, мікрогетерогенність структури покриттів обумовлена наявністю в ПП тугоплавких борвмісних компонентів.

Покриття з ПП 20X11P5Ю3СІ (рисунок 4.3, в) мають меншу мікрогетерогенність, їх структура тонша, оксидних плівок менше, і вони дрібніші, що, ймовірно, пов'язано з меншим ступенем окислення покриттів.



а)

б)

в)

Рисунок 4.3 - Структура на поперечних шліфах покриттів: а - ПП 60X13P5СІ; б - ПП 20X11P5С5І; в - ПП 20X11P5Ю3СІ 1 - оксидні плівки; 2 - метал.

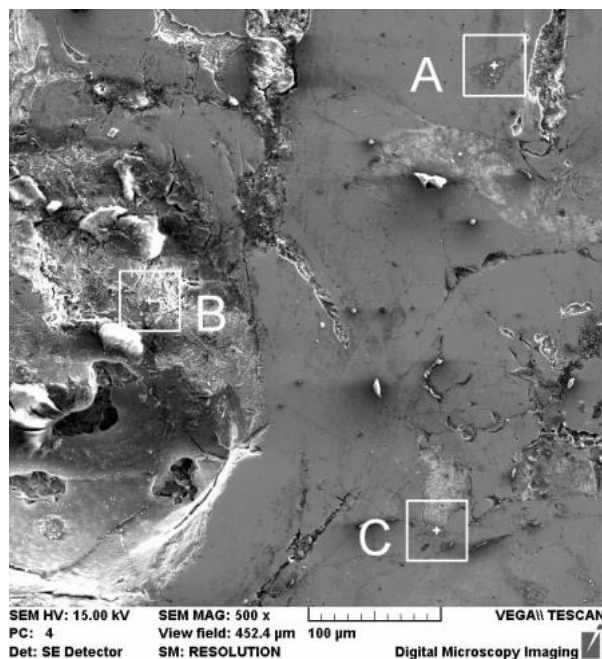


Рисунок 4.4 - Мікроструктура покриття з ПП 20X11P5Ю3СІ: А, В, С – ділянки мікроструктури з різним складом.

Раніше зазначалось, що оксидні плівки сприяють відшаровування металу за механізмом внутрішнього тертя, збільшуючи швидкість механічного зносу покриття. Сприятлива мікроструктура покриття з ПП 20X11P5Ю3СІ з мінімальною кількістю оксидних плівок в кінцевому підсумку може обумовлювати високі показники його фізікомеханічних і експлуатаційних властивостей.

За результатами визначення пористості покриття з ПП 60X13P5СІ максимальний розмір пор становить 24,2 мкм, мінімальний - 1,2 мкм, при цьому число пор з розміром до 10 мкм оцінюється в 92,8%, площа зазначених пор становить 69,7%, обсяг - 46,7% (таблиця 4.5). Для покриття з ПП 20X11P5С5І максимальний розмір пор становить 27,7 мкм, мінімальний - 1,2 мкм, при цьому число пор з розміром до 10 мкм оцінюється в 92,5%, площа зазначених пор складає 69,4%, обсяг - 47,9% (таблиця 4.6.). Для покриття з ПП 20X11P5Ю3СІ максимальний розмір пор становить 28,3 мкм, мінімальний - 0,5 мкм, при цьому число пор з розміром до 10 мкм оцінюється в 96,2%, площа зазначених пор складає 72,2%, обсяг - 49,8% (таблиця 4.7).

Таблиця 4.5

Розподіл часу покриття з ПП 60X13P5СІ за розмірами, площі і обсягу.

<i>D</i> , мкм	0,-2	2-4	4-6	6-8	8-10	Σ
<i>n</i> ,%	30,2	43,7	12,7	4,3	1,9	92,8
<i>A</i> ,%	5,2	22,4	19,4	13,1	9,6	69,7
<i>V</i> ,%	1,1	9	12,9	12,2	11,5	46,7

Таблиця 4.6

Розподіл часу покриття з ПП 20X11P5С5І по розмірам, площі і об'єму.

<i>D</i> , мкм	0,-2	2-4	4-6	6-8	8-10	Σ
<i>n</i> ,%	30,5	42,1	12,5	5	2,4	92,5
<i>A</i> ,%	4,9	20,7	17,8	14,4	11,6	69,4
<i>V</i> ,%	1	8,3	11,7	13,1	13,8	47,9

Таблиця 4.7

Число пор з розміром до 10 мкм.

D, мкм	0,-2	2-4	4-6	6-8	8-10	Σ
n,%	31,7	43,8	13	5,2	2,5	96,2
A,%	5,1	21,5	18,6	14,9	12,1	72,2
V,%	1,1	8,6	12,1	13,7	14,3	49,8

Число великих пор з розмірами більше 10 мкм для покриттів ПП 60X13P5CI, 20X11P5C5I, 20X11P5Ю3CI оцінюється в 2,2; 2,5 і 2,6%, що дозволяє зробити припущення про їх незначну роль в зниженні стійкості покриттів до ударно-абразивного зносу. дрібнопориста структура покриттів свідчить про стабільність процесу розпилення ПП. При цьому найменша пористість у покриття з ПП 20X11P5Ю3CI (2,8%), а найбільша - у покриття з ПП 60X13P5CI (3,5%).

У таблиці 4.8 наведені результати вимірювань мікротвердості трьох покриттів, виконаних по перерізу шліфів. З наведених даних випливає, що найбільшим рівнем середньої твердості характеризується покриття з ПП 20X11P5Ю3CI, а найменшим - покриття з ПП 60X13P5CI.

Таблиця 4.8

Мікротвердість покриття.

Матеріал покриття	Мікротвердість HV0,3		
	Середня	Максимальна	Мінімальна
ПП 60X13P5CI	925±137	1117	636
ПП 20X11P5C5I	904±144	1229	603
ПП 20X11P5Ю3CI	1111±61	1255	945

Найбільшою однорідністю розподілу мікротвердості по товщині відрізняється покриття з ПП 20X11P5Ю3CI, що пояснюється рівномірним розподілом зміцнюючих фаз в твердому розчині і меншою мірою окислення, що приводить до зниження товщини оксидного прошарку. Борні складові в

покритті обумовлюють високі показники твердості, що є одним з головних факторів, що впливають на зносостійкість. В результаті визначення зносостійкості по закріпленому абразиву встановлено, що найбільшу втрату маси мають покриття з ПП 60X13P5CI, а найменшу - покриття з ПП 20X11P5Ю3СИ, при цьому зносостійкість покриттів з ПП 20X11P5Ю3СИ в 3,58 рази вище зносостійкості покриттів з СП 20X13 і в 2,47 рази вище в порівнянні із зразками зі сталі 28MnB5, з яких виготовлені розпушуючі лапи культиватора стерньового важкого (Таблиця 4.9).

Таблиця 4.9

Втрата маси покриттів по закріпленому абразиву.

Матеріал	Зменшення маси зразків			$\Delta m_{\text{ср}}$ , Г	Відносна зносостійкість, $\epsilon$
	$\Delta m_1$ , Г	$\Delta m_2$ , Г	$\Delta m_3$ , Г		
СП 20X13	0,55	0,55	0,55	0,55	0,69
ПП 60X13P5СИ	0,19	0,18	0,19	0,1875	2,01
ПП 20X11P5C5И	0,16	0,16	0,16	0,16	2,37
ПП 20X11P5Ю3СИ	0,156	0,152	0,155	0,154	2,47
Зразок без покриття (28MnB5)	0,39	0,38	0,36	0,38	1

Високі показники зносостійкості покриттів з ПП в порівнянні з покриттями з СП 20X13 можна пояснити високою твердістю борних складових. Найменша гетерогенність і висока твердість покриття з ПП 20X11P5Ю3СИ обумовлюють його високу зносостійкість.

За результатами дослідження показників фізико-механічних властивостей покриттів з ПП 20X11P5Ю3СИ можна зробити висновок про те, що вони мають порівняні значення з покриттями із зарубіжних дротів аналогічного призначення (таблиця 4.10). Це дозволяє рекомендувати їх для зміцнення робочих органів при обробці ґрунтів.

## Порівняння фізико-механічних властивостей покриттів з ПП \*

Марка ПП	ПП 20X11P5Ю3СИ	PMet 296 (Polymet)	EuTronicArc595 (CastolinEutectic)	TAFA 95MXC (Praxair TAFA)
Пористість	2,8	<5	<3	<3
Мікротвердість, HV 0.3*	1111	~1200	~1000	~1100
Адгезія, МПа (довідкова) *		43	40	40

\* За даними виробників порошкових дротів. \*\* Отримано на основі таблиць переводу твердості.

## 4.4 Результати експлуатаційних досліджень

Експлуатаційні дослідження стали завершальним етапом роботи, по результатами якого приймалося рішення про ефективність і доцільність підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Дослідження дозволили визначити зносостійкість деталей в залежності від напрацювання. Для зміцнених розпушуючих лап напрацювання склало 40 га на один робочий орган.

Результати експлуатаційних досліджень зміцнених і серійних розпушуючих лап представлені в таблицях 4.11 і 4.12, графічне зображення на рисунку 4.5. Серійні розпушуючі лапи при напрацюванні 20-25 га досягли граничного стану і були замінені на нові деталі, параметри яких в подальшому не враховувалися. Критеріями граничного зносу розпушуючих лап були: для двостороннього долота - зменшення вильоту носка до переднього краю крилоподібного леміша до 40 мм, для крилоподібного леміша - зменшення ширини захоплення до 420 мм.

Під час експлуатаційних досліджень леміші крилоподібної форми, марковані позиціями 2 і 4 (рисунок 3.8), при досягненні напрацювання 15 га



змінити геометричну форму. Після проведення рихтувальних робіт дані деталі були встановлені на колишні місця.

Таблиця 4.11

Втрата маси серійних розпушуючих лап за результатами досліджень.

Напрацювання, га	Деталь*	Втрата маси розпушуючих лап				$\Delta m_{cp}$ , г
		$\Delta m_2$ , г	$\Delta m_4$ , г	$\Delta m_6$ , г	$\Delta m_8$ , г	
2	КЛ	72	69,5	58	84,5	71
	КД	77,5	80,5	69	83	77,5
6	КЛ	284	271	263	290	277
	КД	318	337	320	315	322,5
10	КЛ	903	884	853	862	875,5
	КД	967	983	973	967	972,5
15	КЛ	1167	1032	1018	1029	1061,5
	КД	1237	1194	1083	1016	1132,5
20	КЛ	1221	1184	1152	1219	1194
	КД	1347	1369	1338	1396	1392,5
25	КЛ	1467	1426	1347	1398	1409,5
	КД	1589	1638	1576	1583	1596,5

Зміна геометричних параметрів лемішів крилоподібної форми, ймовірно, пов'язано з тим, що вони рухаються по колії трактора, де відбувається ущільнення ґрунту.

Таблиця 4.12

Втрата маси зміцнених розпушуючих лап за результатами досліджень.

Напрацювання, га	Деталь*	Втрата маси розпушуючих лап					$\Delta m_{cp}$ , г
		$\Delta m_1$ , г	$\Delta m_3$ , г	$\Delta m_5$ , г	$\Delta m_7$ , г	$\Delta m_9$ , г	
2	КЛ	28	29	30	23	25	27
	КД	36	32	26	30	26	30
6	КЛ	84	73	62	73	88	76
	КД	98	90	84	97	91	92

Продовження таблиці 4.12							
10	КЛ	137	128	134	124	132	131
	КД	172	168	158	143	149	158
15	КЛ	209	203	198	187	193	198
	КД	237	236	229	235	228	233
20	КЛ	281	279	283	274	273	278
	КД	326	317	320	310	312	317
25	КЛ	342	336	329	324	339	334
	КД	403	396	406	391	394	398
30	КЛ	403	397	409	389	382	396
	КД	501	506	492	483	478	492
40	КЛ	533	530	526	519	517	525
	КД	687	675	682	672	664	676

Експлуатаційні дослідження розпушуючих лап показали, що відносна втрата маси при досягненні напрацювання 40 га зміцнених лемішів склала 2,03-2,66 рази, для долота - 1,96-2,37 рази в порівнянні з серійним (напрацювання 25 га), ресурс збільшений в 1,6 рази.

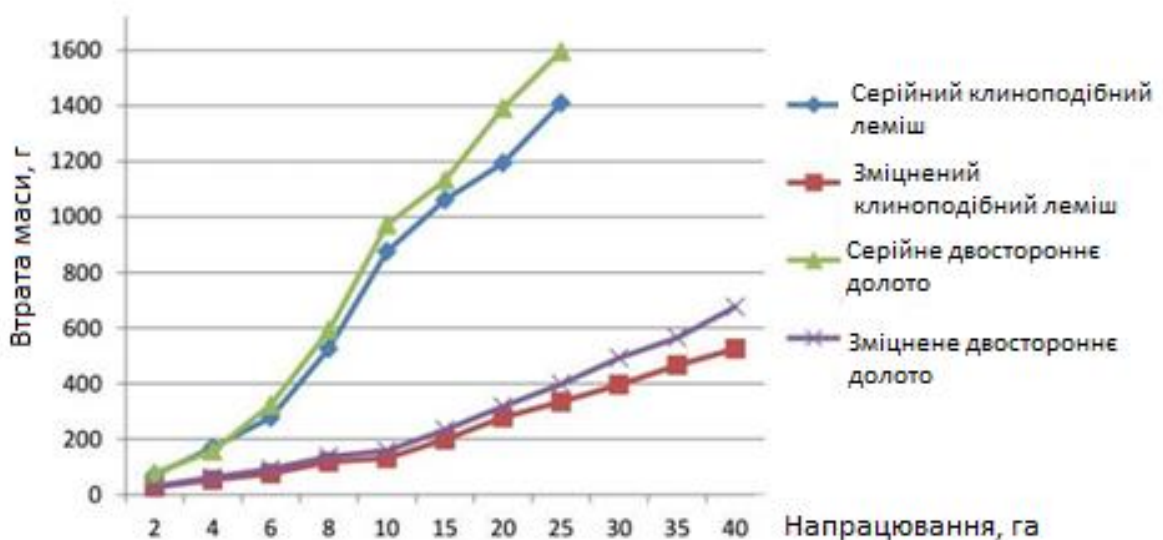


Рисунок 4.5 - Результати втрати маси серійних і зміцнених розпушуючих лап за результатами експлуатаційних досліджень:

\* З використанням порошкового дроту 20X11P5Ю3СИ.

Експлуатаційні дослідження зміцнених розпушуючих лап культиватора стерньового важкого з металізаційним покриттям з ПП 20X11P5Ю3СИ підтвердили позитивні результати лабораторних досліджень і на практиці довели ефективність запропонованої технології нанесення зносостійких покриттів на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин.

## 5 ТЕХНІКО ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 5.1 Розрахунок собівартості зміцнення робочого органу

Економічний ефект від нанесення зносостійких покриттів на робочі органи ґрунтообробних машин виходить від збільшення їх ресурсу в порівнянні з серійними. При цьому необхідно враховувати готову програму, витрати на витратні матеріали та загальновиробничі витрати.

Розрахунок економічної ефективності від впровадження технології зміцнення лап культиваторів нанесенням металізаційних покриттів здійснений в відповідності до методики, рекомендованої для визначення економічної ефективності технологій і сільськогосподарської техніки, наведеної в [29]. Розрахунки виконували в програмному середовищі MatchCad 14 [30-31].

Оптова ціна витратних матеріалів: порошковий дріт 20X11P5Ю3СИ - 226 грн/кг; стиснене повітря - 11 грн./м<sup>3</sup>; пропан – 12,8 грн./л.

Витрата матеріалів для напилення лапи: дроту - 1 кг; стисненого повітря 5 м<sup>3</sup>; пропану 5 л.

Витрати на напилюваний метал  $Z_n$ , грн., Обчислюють за формулою:

$$Z_n = \sum_{i=1}^m K_{pi} \cdot q_{ni} \cdot C_{ni} \cdot \left(1 + \frac{P_{mz}}{100}\right) \quad (5.1)$$

де  $m$  - кількість видів дротів;

$K_{pi}$  - витратний коефіцієнт  $i$ -го матеріалу;

$q_{ni}$  - маса нанесеного металу, кг;

$C_{ni}$  - оптова ціна дроту, грн./кг;

$P_{mz}$  - транспортно-заготівельні роботи, %.

$$Z_n = 1 \cdot 226 \cdot \left(1 + \frac{25}{100}\right) = 282,5 \text{ грн.}$$

Витрати на гази  $Z_g$ , грн., Обчислюють за формулою

$$Z_g = \sum_{i=1}^m H_i \cdot C_i \cdot \left(1 + \frac{P_{mz}}{100}\right) \quad (5.2)$$

де  $m$  - кількість видів використаних газів;

$H_i$  - витрата газу;

$C_i$  - оптова ціна газу, грн./л;

$P_{mz}$  - транспортно-заготівельні роботи, %.

$$Z_r = 5 \cdot 12,8 \cdot \left(1 + \frac{25}{100}\right) + 5 \cdot 11 \cdot \left(1 + \frac{25}{100}\right) = 145,8 \text{ грн.}$$

Витрати на технологічну електроенергію  $Z_m$ , грн., Обчислюють за формулою

$$Z_m = \frac{C_{ee} \cdot h \cdot \eta}{1000} \cdot \left( \frac{I_{cb} \cdot U_d \cdot t_0 \cdot \eta}{100} + W_{x.x} (t_{шк} - t_0) \right) \quad (5.3)$$

де  $C_{ee}$  - тариф на електроенергію, грн./кВт;

$I_{cb}$  - струм, А;

$U_d$  - напруга, В;

$t_0$  - основний час наплення, год;

$\eta$  - ККД джерела живлення;

$W_{x.x}$  - потужність холостого ходу джерела живлення, Вт;

$t_{шк}$  - штучно-калькуляційний час операції наплення.

$$Z_m = \frac{2,423 \cdot 1,05}{1000} \cdot \left( \frac{320 \cdot 34 \cdot 1 \cdot 80}{100} + 0 \cdot (1,5 - 1) \right) = 22,14 \text{ грн.}$$

\* Джерело живлення автоматично вимикається.

Заробітну плату виробничих робітників  $Z_{пр}$ , грн, розраховують за формулою

$$Z_{пр} = K_p \cdot K_{доп} \cdot K_{cc} \cdot C_{тар} \cdot t_{шк} \quad (5.4)$$

де  $K_p$  - районний коефіцієнт;

$K_{доп}$  - коефіцієнт додаткової заробітної плати;

$K_{cc}$  - коефіцієнт, що враховує відрахування в єдиний соціальний фонд;

$C_{тар}$  - годинна тарифна ставка, грн./год;

$t_{шк}$  - штучно-калькуляційний час операції наплення.

$$Z_{пр} = 1,15 \cdot 1,3 \cdot 1,26 \cdot 45,6 \cdot 1,5 = 129 \text{ грн.}$$

Загальна вартість обладнання становить 30000 грн.

Витрати на амортизаційні відрахування  $Z_a$ , грн., Обчислюють за формулою:

$$Z_a = \frac{C_{обл} \cdot a \cdot t_{шк}}{F_d \cdot K_3 \cdot K_{вн} \cdot 100} \quad (5.5)$$

де  $C_{обл}$  - вартість обладнання, грн.;

$a$  - нормативний коефіцієнт амортизаційних відрахувань, %;

$t_{шк}$  - штучно-калькуляційний час операції напилення, год;

$F_d$  - річний дійсний фонд часу роботи обладнання, год;

$K_3$  - коефіцієнт завантаження обладнання;

$K_{вн}$  - коефіцієнт виконання норм.

$$Z_a = \frac{30000 \cdot 3,4 \cdot 1,5}{180 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 100} = 11,8 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію для двигунів  $Z_e$ , грн., Обчислюють за формулою

$$Z_e = \frac{N_d \cdot K_0 \cdot K_N \cdot K_{30} \cdot t_{шк}}{\eta \cdot K_{вн}} \cdot C_{ен}, \quad (5.6)$$

де  $N_d$  - кількість електродвигунів;

$K_0$  - коефіцієнт одночасності роботи електродвигунів;

$K_N$  - коефіцієнт завантаження електродвигунів за потужністю;

$K_{30}$  - коефіцієнт використання обладнання;

$t_{шк}$  - штучно - калькуляционное час операції напилення, ч;

$\eta$  - середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів;

$K_{вн}$  - коефіцієнт виконання норм;

$C_{ен}$  - тариф на електроенергію, грн./кВт.

$$Z_e = \frac{6 \cdot 0,75 \cdot 0,9 \cdot 1,05 \cdot 1,5}{0,8 \cdot 0,9} \cdot 2,423 = 21,46 \text{ грн.}$$

Заробітну плату ремонтних робітників  $Z_{зп}$ , грн., Обчислюють за формулою

$$Z_{зп} = K_p \cdot K_{дод} \cdot K_{сс} \cdot C_{тар} \cdot \frac{T_p \cdot t_{шк}}{F_d \cdot K_{вн} \cdot K_3} \quad (5.7)$$

де  $K_p$  - районний коефіцієнт;

$K_{дод}$  - коефіцієнт додаткової заробітної плати;

$K_{сс}$  - коефіцієнт, що враховує відрахування в єдиний соціальний фонд;

$C_{тар}$  - годинна тарифна ставка, грн./год;

$T_p$  - трудомісткість ремонтних робітників, год;

$t_{шк}$  - штучно-калькуляційний час операції, год;

$K_{вн}$  - коефіцієнт виконання норм;

$K_3$  - коефіцієнт завантаження устаткування.

$$З_{зп} = 1,15 \cdot 1,3 \cdot 1,26 \cdot 45,65 \cdot \frac{100 \cdot 1,5}{180 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 99,52 \text{ грн.}$$

Матеріальні витрати на ремонт обладнання  $З_M$ , грн., Обчислюють за формулою

$$З_M = З_{зп} \cdot K_p \quad (5.8)$$

де  $K_p$  - коефіцієнт, що враховує матеріальні витрати на ремонт обладнання.

$$З_M = 99,52 \cdot 0,5 = 49,76 \text{ грн.}$$

Витрати на знос малоцінних інструментів і швидко зношуваних пристосувань  $З_N$ , грн., розраховують за формулою

$$З_N = \frac{t_{шк} \cdot h_{нс}}{K_{вн}} \quad (5.9)$$

де  $t_{шк}$  - штучно-калькуляційний час операції, год;

$h_{нс}$  - середні витрати на інструмент за одну годину експлуатації обладнання, грн./год;

$K_{вн}$  - коефіцієнт виконання норм.

$$З_N = \frac{1,5 \cdot 14}{0,9} = 23,3 \text{ грн.}$$

Витрати на освітлення  $З_o$ , грн., Обчислюють за формулою:

$$З_o = \frac{Ц_{ее} \cdot n \cdot N \cdot t_{шк}}{1000} \quad (5.10)$$

$n$  - кількість освітлювальних приладів, шт. ;

$N$  - середня потужність елементів освітлення, Вт/год·шт.

$$З_o = \frac{2,423 \cdot 5 \cdot 750 \cdot 1}{1000} = 9,12 \text{ грн.}$$

Собівартість зміцненої лапи приведена в таблиці 5.1.

## Собівартість зміцненої лапи.

Статі собівартості		Сума, грн.
1	Проволока	282,5
2	Гази	145,8
3	Технологічна електроенергія	22,14
4	Електроенергія для двигуна	21,46
5	Електроенергія для освітлення	9,12
6	Заробітна плата виробничих робіт	129
7	Амортизаційні відрахування	11,8
8	Заробітна плата ремонтних робітників	99,52
9	Матеріальні витрати на ремонт обладнання	49,76
10	Затрати на знос швидкозношуваних пристосувань	23,3
Всього: технологічна собівартість		794,4

## 5.2 Оцінка економічної ефективності технології

Собівартість виробів з урахуванням комерційних витрат  $Z_{\text{КВ}}$ , грн., обчислюють за формулою:

$$Z_{\text{КВ}} = C_{\text{Т}} \cdot K_1 \quad (5.11)$$

де  $C_{\text{Т}}$  - технологічна собівартість, грн.;

$K_1$  - коефіцієнт, що враховує накладні витрати і податки.

$$Z_{\text{КВ}} = 794,4 \cdot 1,6 = 1271,04 \text{ грн.}$$

При оцінці економічної ефективності потрібно враховувати ресурс лап по напрацюванні до граничного стану. Аналіз експлуатаційних досліджень показує, що серійні розпушуючі лапи досягли граничного стану після 25 га, в той час як у зміцнених напрацювання до граничного стану досягла після 40 га, тобто ресурс робочих органів збільшився в 1,6 рази.

Умовну річну ефективність  $E_p$ , грн., Обчислюють за формулою

$$E_p = (C_6 - Z_{\text{КВ}}/p)n, \quad (5.12)$$



де  $C_6$  - собівартість виробу в базовому варіанті, грн.;

$p$  - зниження собівартості за рахунок збільшення ресурсу;

$n$  - обсяг річного випуску.

$$E_p = (825 - 1271,04/1,6)200 = 6120 \text{ грн.}$$

Час окупності проекту  $T_o$ , грн., Розраховують за формулою

$$T_o = I/E_p \quad (5.13)$$

де  $I$  - інвестиційні витрати, грн.

Капітальні вкладення  $K$ , грн., За даними контрагентів, складають: вартість обладнання - 30000; транспортні витрати - 4000; монтаж обладнання - 12000.

$$I = K \cdot k = 46000 \cdot 1,2 = 55200 \text{ грн.}$$

$$T_o = \frac{55200}{6120} = 9,019 \text{ роки.}$$

Термін окупності проекту при річному напрацюванні установки в 200 лап становить 9,019 років, при збільшенні навантаження до 1000 відновлених лам, ми вже в наступному році отримаємо прибуток, по капіталовкладеннях.

## Висновки

Ступінь окислювання металізаційних покриттів з використанням порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ в 1,89 рази нижче, а міцність на зношування в 3,58 рази вище, ніж у металізаційних покриттів з суцільного дроту 20X13. Методом планування експерименту визначено технологічні параметри дугової металізації порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ по критеріям максимальної міцності покриттів: сила струму -  $320 \pm 15$ А; напруга -  $34 \pm 1,5$ В; товщина покриття -  $0,7 \pm 0,05$  мм; дистанція напилювання -  $95 \pm 5$ мм.

Лабораторними дослідженнями встановлено залежність фізико-механічних і експлуатаційних властивостей металізаційних покриттів з порошкових дротів від їх системи легування. Мікротвердість покриттів з порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ в середньому в 1,21 рази вище, пористість в 1,40 рази нижче, а зносостійкість в 1,15 рази вище, ніж для покриттів з порошкового дроту 60X13P5СІ. Металографічні дослідження показали, що структури металізаційних покриттів з порошкових дротів 60X13P5СІ, 20X11P5С5І, 20X11P5Ю3СІ відрізняються.

Експлуатаційні дослідження розпушюючих лап з покриттям з порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ показали, що відносна зносостійкість зміцнених крилоподібних лемішів склала 2,03-2,66 рази, для двостороннього долота - 1,96-2,37 рази по відношенню до серійних, що обумовлено високими показниками фізико-механічних і експлуатаційних властивостей металізаційних покриттів. Розроблено технологічний процес дугової металізації зносостійких покриттів з порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ, що дозволяє підвищити зносостійкість робочих поверхонь розпушюючими лапами культиватора і їх ресурс в 1,6 рази. Економічна ефективність пропонованого технологічного процесу зміцнення розпушюючих лап культиватора стерньового важкого з використанням порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ, для програми зміцнення 200 шт. склала 6120 грн на рік.

## Список використаних джерел

1. Перспективи і напрямки розвитку сучасного механізованого сільськогосподарського виробництва (Частина I «Сучасні напрямки розвитку технологій в рослинництві»): Методичні вказівки по вивченню дисципліни та виконанню практичних робіт / Середа Л.П.,– Вінниця РВВ ВНАУ, 2020. – 128 с.
2. Ринок сільгосптехніки України очима її дилерів / Електронний ресурс / Режим доступу вільний: <http://www.agroprofi.com.ua/statti/1726-rynok-silhosptekhniky-ukrayiny-ochyma-yiyi-dyleriv>
3. Шкільов О.В. Стан матеріально-технічної бази сільського господарства та джерела її оновлення / О.В. Шкільов // Формування і реалізація державної політики розвитку матеріально-технічної бази агропромислового комплексу в Україні. – К. : ІАЕ УААН, 2003. – С. 398–40
4. Ринок техніки 2020: чи буде трактор у полі / Електронний ресурс // Режим доступу: <https://agroportal.ua/ua/views/blogs/rynok-tekhniki-2020-budet-li-traktor-v-pole/>
5. Непочатенко А.В. Вплив рівня зносу машинотракторного парку на основні результативні показники діяльності сільськогосподарських підприємств / А.В. Непочатенко, В.А. Непочатенко // Економіка та управління АПК: зб. наук. праць. — Біла Церква, 2012. — Вип. 9 (97). — С. 9—12.
6. Зносостійкість сплавів, відновлення і зміцнення деталей машин / Під загальною редакцією. В.С. Попова .- Вид. ВАТ Мотор Січ .- Запоріжжя, 2006 .- 420С.
7. Сігова В.І., Руденко П.В. Методи локальної поверхневої обробки деталей машин: Навчальний посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 218 с.
8. Ramech, K.T. Nanomaterials Mechanics and Mechanisms. Springer Science Business Media, LLC, 2009. 300 p

9. Сідашенко О.І. Ремонт машин та обладнання: Підручник /за ред. О.І. Сідашенко, О.А. Науменка. - Х.: "Міськдрук", 2010. -744 с.
10. Паладійчук Ю.Б, Зінев М.В. Спеціалізовані ремонтні підприємства, стан і перспективи розвитку чи занепаду // Сучасні проблеми землеробської механіки: збірник наукових праць XVIII міжн. наук. конф. (1618 жовтня 2017 р., м. Кам'янецьПодільський). Тернопіль : Крок, 2017. 240 с
11. Технічний сервіс в АПК: навчальний посібник / Л.В. Швець, Ю.Б. Паладійчук, О.О. Труханська. Вінниця: ВНАУ, 2019. – 648 с.
12. Лауш П.В. і ін. Технічне обслуговування і ремонт машин. – К.: Вища школа, 2013.
13. Миколаїв, С.Н. Сучасний технічний сервіс техніки: світовий досвід [Текст] / С.М. Миколаїв // Будівельна техніка та технології. -2002 2.
14. Добровольський, А.Г. Абразивна зносостійкість матеріалів: довідковий посібник / А.Г. Добровольський, П.І. Кошеленко. Київ: Техніка, 1989. 128 с.
15. Будко, С.І. Методи підвищення ефективності зміцнення деталей лемішно-відвальних плугів дуговим наплавленням твердими сплавами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 20 с.
16. Василенко, Н.А. Перспективи застосування локального зміцнення при виготовленні і відновленні робочих органів // Техніка АПК. 2008. Вип. 1. С. 29-31.
17. Добровольський, А.Г. Абразивна зносостійкість матеріалів: довідковий посібник / А.Г. Добровольський, П.І. Кошеленко. Київ: Техніка, 1989. 128 с.
18. Довлатян, В.А. Дослідження зносу плоскоріжучих лап бавовняного культиватора залежно від швидкості руху: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.А. Довлатян. Ташкент, 1966. 19 с
19. Поверхнева міцність матеріалів при терті / Б.І. Костецький і ін .; під заг. ред. Б.І. Костецького. Київ: Техніка, 1976. 296 с.
20. Поверхнева міцність матеріалів при терті / Б.І. Костецький, І.Г. Носівський і ін .; під заг. ред. Б.І. Костецького. Київ: Техніка, 1976. 296 с.

21. Газотермічні покриття з порошкових матеріалів: довідник / Ю.С. Борисова, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Аруатовская. Київ: Наукова думка, 1987. 544 с.
22. Веселовська Н.Р., Турич В.В., Руткевич В.С. Матеріалознавство і ТКМ. Методичні вказівки по вивченню та виконанню практичних робіт (частина 1), для студентів першого бакалаврського рівня вищої освіти, галузі знань 13 «Механічна інженерія» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» та галузі знань 20 «Аграрні науки та продовольство» спеціальності 208 «Агроінженерія»/ – Вінниця ВНАУ, 2020. – 114 с
23. Веселовська Н.Р., Турич В.В., Руткевич В.С. Матеріалознавство і ТКМ. Методичні вказівки по вивченню та виконанню практичних робіт (частина 2), для студентів першого бакалаврського рівня вищої освіти, галузі знань 13 «Механічна інженерія» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» та галузі знань 20 «Аграрні науки та продовольство» спеціальності 208 «Агроінженерія»/ – Вінниця ВНАУ, 2020. – 67 с.
24. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни «Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів» для студентів спеціальностей 208 «Агроінженерія» та 133 «Галузеве машинобудування» денної та заочної форм навчання / Н.Р.Веселовська, В.В.Турич, Руткевич В.С. – Вінниця ВНАУ, 2018. – 43 с.
25. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures / B. Wielage, H. Pokhmurska, M. Student, V. Gvozdeckii, T. Stupnyuskij, V. Pokhmurskii // Surface & Coatings Technology. 2013. 220. P. 27–35
26. Zdenik A. Thermodynamic Conditions for the Nucleation of Boron Compounds during the cooling of steel / A. Zdenik // Materiali in Tehnologije / Materials and Technology. 2011. 45 (2). P. 111–113.
27. Грищук Ю.С. Основи наукових досліджень: Навч. Посібник. / Ю.С. Грищук. – Харків: НТУ «ХП», 2008.-232 с.

28. Цуркан О.В., Полевода Ю.А., Ковальчук О.С. Методичні вказівки для самостійної роботи студентів із дисципліни "Основи наукових досліджень" для студентів напряму підготовки 6.050503 "Обладнання переробних і харчових виробництв" денної та заочної форми навчання. – Вінниця: ВНАУ, 2017. – 44 с
29. Калетнік Г.М., Скорук О.П., Токарчук Д.М. Інженерний менеджмент. Методичні вказівки до виконання курсової роботи для студентів факультету механізації сільського господарства спеціальності 8.091902 „Механізація сільського господарства” форма навчання денна і заочна – Вінниця: ОЦ ВДАУ, 2009. – 68 с
30. Левчук О.В., Новицька Л.І., Дзись В.Г. Кореляційно-регресійний аналіз в Mathcad: довідник для студентів спеціальностей - 201 «Агрономія», 101“Екологія”, 205 “Лісове господарство”, 206 “Садово-паркове господарство” – Вінниця: ВНАУ, 2016. – 152 с.
31. Дзись В.Г., Левчук О.В., Новицька Л.І., Смілянець О.Г., Бубновська.І.А. Довідник . Програмування в Mathcad . – Вінниця. Видавничий центр ВНАУ 2015.– 187 с.
32. Методичні рекомендації написання та оформлення дипломних робіт для студентів денної та заочної форм навчання факультету механізації сільського господарства освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» / [Середа Л.П, Швець Л.В, Гунько І.В, Пришляк В.М.]. – Вінниця.: 2015. – 23 С.

## Додатки

Сертифікат якості розпушуючих лап.



C/ UROLA N°10. APTDO. N°1. 20230. LEGAZPI. GUIPÚZCOA. ESPAÑA.  
TEL. (943)73 90 00. TELEX. 38854 PEL-E. FAX. (943)73 15 01.

**CERTIFICATE**  
**BELLOTA HERRAMIENTAS**

The Bellota discs are according to the requirements of technical characteristics and superficial finishing defined in their specifications. The steel, the production process and the applied thermal treatment guarantee their quality:

- Steel: 28MnB5
- Limit of the chemical composition:
  - %C: 0,26 / 0,30
  - %Mn: 1,10 / 1,40
  - %Si: 0,20 / 0,35
  - %S: < 0,010
  - %P: < 0,020
  - %Cr: < 0,25
  - %B<sub>soluble</sub>: 0,002 / 0,004
  - %B<sub>total</sub>: < 0,005
- Thermal treatment: Quenching
- Hardness: 48 / 52 HRc

Legazpi, 27 January 2010

Sign.: JOSEBA SÁIZ  
QUALITY MANAGER



## Технічні характеристики установки АДМ-10

№	Характеристика	Значення
1	Матеріал проволоки	Al, Cu, Mo, NiCr, сталь
2	Діаметри застосовуваної дроту, мм	Від 1,6 до 2,2
3	Швидкість подачі дроту, м/хв	Від 0 до 6,3
4	Регулювання швидкості	Плавне
5	Електродвигун приводу подачі дроту: - тип - номінальна потужність, кВт - номінальна частота обертання, об / хв	ДПР-72-Ф6-06 0,045 6000
6	Редуктор приводу подачі	Червячний
7	Струмopідведення на електроді дроту: - Напруга, В - Робочий струм, А	Від 17 до 40 Від 100 до 380
8	Робочий тиск газів, МПа: - повітря - пропан	Від 0,6 до 0,8 Від 0,2 до 0,4
9	Загальна витрата повітря при 6 атм., м <sup>3</sup> /хв	1,5
10	Габаритні розміри металізатора, мм	290x255x75

Діалогове вікно програми oxidat10 з параметрами розрахунків.

```

Free Pascal IDE
oxidat10.pas
program oxidation;
Const
V = 1.2; {Конвективная постоянная, с-0.5}
R = 82; {Универсальная газовая постоянная, куб.см*атм/моль*К}
g = 1.47; {Расход проволоки, г/с}
{Перечень компонентов (FeO), [C], [O], (Cr2O3), [Cr], (Al2O3), [Al]}
MB_Fe = 56; {Молекулярный вес Fe, г/моль}
rhoFe = 6.2; {Плотность жидкого металла, г/куб.см}
rhoS = 5.5; {Плотность жидкого шлака, г/куб.см}
Ccomp1 : Array [1..4] of extended = (0.11, 0.0126, 10, 3, 0, 0.04, 5, 1);
{Исходные весовые концентрации [C], [O], [Cr], [Al], [Si], [S], [B], [Y] в капле, %}
Coxid1 : Array [1..3] of extended = (5, 5, 20, 10, 10, 50);
{Содержание FeO, Cr2O3, Al2O3 в шлаке на 1 шаге расчета, %}
MBoxid : Array [1..3] of extended = (42, 102, 152, 60, 70, 226);
{Молекулярный вес FeO, Cr2O3, Al2O3, SiO2, B2O3, Y2O3 г/моль}
MBcomp : Array [1..4] of extended = (12, 16, 52, 27, 28, 32, 11, 89);
{- Молекулярный вес [C], [O], [Cr], [Al], [Si], [S], [B], [Y] г/моль}
Doxid : Array [1..3] of extended = (1.0E-5, 2E-4, 2E-3, 1.0E-6, 1E-6);
{Кoeffициенты диффузии (FeO), (Cr2O3), (Al2O3), SiO2, B2O3, Y2O3 кв.см/с}
Dcomp : Array [1..4] of extended = (5.4E-5, 12.2E-5, 3.3E-5, 1.55E-5, 1E-5, 1E-5);
{Кoeffициенты диффузии [C], [O], [Cr], [Al], [Si], [S], [B], [Y] кв.см/с}
1:1 =
F1 Help F2 Save F3 Open Alt+F9 Compile F9 Make Alt+F10 Local menu

```

## Комплект установки АДМ-10.

№	Назва	Примітка
1	Металізатор	
2	Пульт керування	
3	Блок комутації	Для входу повітря штуцер $\varnothing 18$ мм кріпиться накладною гайкою на М22х1,5 Кабелі КГхл 1х25 входять в корпус через отвори $\varnothing 20$ і кріпляться через наконечники на осі М8
4	Комплект шлангів і джгутів	Від комутаційної коробки до металізатора довжина пакета шлангів і джгутів становить 1,5 м для поста зносостійких покриттів
5	Стійка для касет	
6	Редуктор пропановий, БПО 5-3	
7	Редуктор повітряний R-200-3/8 М, GAV	Заміна – пневмоклапан редукційний типу П-КРМ, 122-16
8	Коллектор Ду 20 М-М з кранами 3хДу15	
9	Перехідник	З'єднання редукторів, колектора з рукавом
10	Джерело живлення зварювальне ВДГ-401	
11	Рукав І-6,3-0,63 ГОСТ 9356-75	Для подачі пропану, мінімально 5 м
12	Рукав І-9-0,63 ГОСТ 9356-75	Для технологічних потреб
13	Рукав Г(ІУ)-10-16-28-У ГОСТ 18698-79	Для подачі стисненого повітря, довжина по відстані до місця підведення повітря
14	Кабель КГхл 3х10+1х6	Для підключення джерела живлення
15	Кабель КГхл 1х25	2 шт. по 3–10 м
16	Балон пропановий 50 л	
17	Окуляри захисні, ГОСТ 12.4.013-85Е	
18	Навушники протишумні	
19	Респіратор промисловий захисний 3М 620Р двосторонній	
20	Скафандр МИОТ-49	