МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Мельник Оксана Павлівна

УДК 621.791

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Відновлення робочої поверхні шнека плазмовим напиленням

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Мельник О.П.

Керівник роботи
Савченко В.М.
кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Мельник Оксана Павлівна. Відновлення робочої поверхні шнека плазмовим напиленням. – ***Кваліфікаційна робота на правах рукопису.***

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

В магістерській роботі обґрунтовано та експериментально підтверджено, нанесення композитних матеріалів на поверхні деталей плазмовим напиленням, що забезпечує високу точність переміщення плазмотрону щодо відновлюваної деталі поверхні. Отримано аналітичні залежності кінематичних режимів плазмового напилення від геометричних особливостей поверхонь шнека, товщини композитного покриття і температури нагрівання робочих поверхонь. Також, отримано аналітичні залежності визначення величини зміщення ізотерми плавлення щодо ізотерми контакту. Розроблено програмні продукти для автоматизації розрахунків параметрів плазмового напилення поверхонь деталей машин.

Встановлено, що зносостійкість отриманого композитного покриття у 2,52 рази перевищує зміцнювальний шар легованого покриття з порошку ПР-НХ17СР4 та у 3,39 рази поверхневий шар деталі із сталі 20Х без функціонального покриття. Мікротвердість композитного покриття 76,5% ПР-НХ17СР4+23,5%TiC в 1,4 рази вище, ніж мікротвердість легованих покриттів ПР-НХ17СР4+TiC та в 1,7 рази вище. Ніж мікротвердість стандартних покриттів ПР-НХ17СР4.

Результати дозволяють рекомендувати розроблену технологію відновлення та склад композитного матеріалу для відновлення зношених поверхонь композитного матеріалу для відновлення зношених поверхонь шнеків, які дуже активно використовуються на підприємствах АПК.

Ключові слова: шнек, напилення, покриття, плазмове напилення.

ANNOTATION

Melnyk Oksana Pavlivna. Restoration of the working surface of the screw by plasma spraving. – *Qualification work on the rights of the manuscript*.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2023.

The master's thesis substantiated and experimentally confirmed application of composite materials to the surface of parts by plasma spraying, which ensures high accuracy of the plasma torch movement relative to the surface of the part being repaired. The analytical dependences of the kinematic modes of plasma sputtering on the geometric features of the screw surfaces, the thickness of the composite coating, and the heating temperature of the working surfaces were obtained. Also, analytical dependences for determining the value of the shift of the melting isotherm relative to the contact isotherm were obtained. Software products have been developed to automate the calculation of plasma spraying parameters of machine parts surfaces.

It was found that the wear resistance of the obtained composite coating is 2.52 times higher than the strengthening layer of the alloy coating made of PR-NX17SR4 powder and 3.39 times higher than the surface layer of a 20X steel part without a functional coating. The microhardness of the composite coating of 76.5% PR-NC17Cr4+23.5% TiC is 1.4 times higher than the microhardness of the alloyed coatings of PR-NC17Cr4+TiC and 1.7 times higher. Lower than the microhardness of standard coatings PR-NX17SR4.

Keywords: screw, spraying, coating, plasma spraying.

The results make it possible to recommend the developed restoration technology and the composition of the composite material for restoring the worn surfaces of the composite material for restoring the worn surfaces of augers, which are very actively used in agricultural enterprises.

Keywords: screw, spraying, coating, plasma spraying.

ЗМІСТ

ВСТУП……..……5
РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ УМОВ РОБОТИ ШНЕКІВ ТА ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЇХНЮ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ…..……9
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХІНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТНОГО ПОКРИТТЯ…...…….……..……25
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕНЬ.....….32
ВИСНОВКИ……..…..…….47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……...……...……..48

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. На сьогоднішній день в агропромисловому комплексі (АПК) ефективне використання спеціального обладнання забезпечується своєчасним технічним обслуговуванням та якісним виконанням ремонтних робіт [3]. При цьому необхідно врахувати, що вартість запасних деталей становить майже 70 % від загальної вартості проведення ремонту, а вартість відновлених деталей – 40…60 % вартості нових. Отже, завдання відновлення з метою подальшого використання робочих вузлів та механізмів спеціального обладнання є актуальною [1].

У сільському господарстві під час транспортування зернових культур та інших сипучих матеріалів активно використовуються шнекові транспортуючі конвеєри, у яких найвідповідальнішим агрегатом є шнек. Ресурс та працездатність конвеєра безпосередньо залежать від ступеня зносу робочих поверхонь шнека, що транспортує. При цьому до 50% всіх проблем, пов'язаних із зносом деталей машин у секторі сільського господарства, посідає абразивний знос [1].

Для відновлення та зміцнення робочих поверхонь деталей машин та механізмів АПК активно застосовують газотермічні технології з нанесення покриттів, зокрема плазмове напилення. Крім того, одним з перспективних та економічно вигідних шляхів збільшення ресурсу відновлюваних деталей є розробка функціональних композитних покриттів та їх нанесення на робочі поверхні деталей сіль господарських машин [1].

При розробці нових функціональних покриттів із високою зносостійкістю, як правило, за основу приймають високолеговані сплави на основі нікелю чи заліза. робота присвячена відновленню робочих поверхонь деталей транспортуючих пристроїв АПК, що працюють в умовах інтенсивного зношування абразивного, плазмовим напиленням зносостійких композитних покриттів. Проте на сьогоднішній день наукові дослідження з напилення

металоматричних композитів на сталеві робочі поверхні деталей, які експлуатуються в умовах абразивного зношування, недостатньо вивчені. Робота присвячена відновленню робочих поверхонь деталей транспортуючих пристроїв АПК, що працюють в умовах інтенсивного зношування абразивного, плазмовим напиленням зносостійких композитних покриттів [1].

Об'єктом дослідження: є композитні покриття на основі порошку ПР-НХ17СР4, нанесені газотермічним способом плазмового напилення на робочі поверхні шнека транспортуючого конвеєра [1].

Предмет дослідження: фізико-механічні властивості дисперсно-наповнених композитних покриттів, одержаних способом плазмового напилення [1].

Мета роботи: підвищення зносостійкості та зниження собівартості відновлення робочих поверхонь шнека транспортуючого конвеєра газотермічним способом плазмового напилення зносостійкого композитного покриття[1, 2].

У зв’язку з поставленою метою в цій роботі вирішувалися такі науково-практичні завдання: одержати аналітичні залежності кінематичних режимів плазмового напилення від геометричних особливостей робочих поверхонь шнека для формування зносостійкого композитного покриття; розробити новий склад дисперсно-наповненого композитного матеріалу для плазмового напилення зносостійких покриттів; визначити раціональні технологічні режими нанесення композитного матеріалу плазмовим напиленням; розробити обладнання для плазмового напилення, що дозволяє одержувати якісні композитні покриття на гвинтових та циліндричних поверхнях шнека.

Методи наукового дослідження.

Під час виконання експериментальньних досліджень застосовувати як методи системного аналізу та теорії електрофізичного формоутворення поверхневого шару. Наукова методика дослідження полягає в комплексному розгляді взаємозв’язку технологічних режимів плазмового напилення, міцності

зчеплення покриття з основою, твердості, мікротвердості, зносостійкості та мікроструктури сформованого покриття. Експериментальні дослідження проведено з використанням сучасних стандартизованих методик на сертифікованому обладнанні та розробленій установці. Результати дослідження проведено з використанням сучасних стандартизованих методик на сертифікованому обладнанні та розробленій установці. Результати досліджень оброблялися з використанням методів дисперсійного та регресійного аналізу.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. **Мельник О.П.**, Добранський С.С. Відновлення робочих поверхонь шнека транспортуючих пристроїв плазменним напиленням зносостійкого композитного покриття. Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь», 5 квітня 2023 року Житомир: Житомирський агротехнічний фаховий коледж, 2023. С. 161-162.

2. **Мельник О.П.,** Добранський С.С. Особливості умов роботи шнеків та фактори, які визначають їх зносостійкість. Матеріали Міжнародна науково-практичної конференція «продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклику для України та світу». МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 25 травня 2023 р. С. 197-200.

3. **Мельник О.П.** Конструктивні та експлуатаційні способи підвищення терміну служби робочих поверхонь шнеків.. *Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки"* (17–19 жовтня 2023 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2023.С. 325-328.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено склад дисперсно-наповненого композитного матеріалу, що складається з безперервної фази – самофлюсуючого порошку ПР-НХ17СР4 та дисперсної фази – карбіду титану. Сформоване покриття з розробленого композитного матеріалу на

робочих поверхнях шнека має високі фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. Розроблено технологічні режими плазмового напилення дисперсно-наповненого композитного матеріалу, що забезпечують високу когезію та зносостійкість покриття, а також необхідну міцність його зчеплення із основою. Розроблено установку для нанесення композитних матеріалів на поверхні деталей плазмовим напиленням, що забезпечує високу точність переміщення плазмотрона щодо оброблюваної поверхні деталі, що безпосередньо позитивно впливає на якість покриття, що формується.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 15 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 49 сторінки комп'ютерного тексту, містить 21 рисунок та 8 таблиць.

РОЗДІЛ 1
ОСОБЛИВОСТІ УМОВ РОБОТИ ШНЕКІВ ТА ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЇХНЮ ЗНОСОТІЙКІСТЬ

Як показує практика, застосування транспортуючих шнекових конвеєрів (рис. 1.1) в агропромисловому комплексі на сьогоднішній день дуже актуально, через їх високу ефективність та ремонтопридатності. При цьому умови їхньої роботи безпосередньо залежать від фізико-механічних властивостей матеріалів, що транспортуються [2].

Найчастіше шнекові транспортуючі конвеєри застосовуються у комплексній механізації технологічних процесів та транспортних операцій. Даний вид конвеєрів використовується в таких галузях промисловості: будівельна, хімічна, харчова, сервісного обслуговування, комунальне господарство, легка промисловість та сільське господарство. У більшості з наведених галузей промисловості даний вид конвеєрів експлуатується для здійснення транспортування різних абразивних сумішей, таких як дублені відходи, вапно, хімікати та інше [2].

Рис. 1.1. Приклади виконання та експлуатації шнекових транспортуючих конвеєрів у сільському господарстві.

Найширше застосування шнекові транспортуючі конвеєри знайшли у сільському господарстві, зокрема під час транспортування зернових культур, абразивних порошкових сумішей різних фракцій та щільності, сипучих матеріалів та хімічних порошкоподібних елементів [2].

Зокрема, для транспортування зерна, а також продуктів, отриманих після його переробки, безпосередньо на підприємствах АПК використовують гвинтові конвеєри як: У13-БКШ, БКВ, УКХ 1 L10, УКХ, СВТ, КВЦ300, У9-УКХ (у жолобі). Варто зазначити, що шнек також активно використовується на таких пристроях, як: самоподавач шнековий пересувний УСВ, самоподавець шнековий пересувний УСШ, розвантажувач "Хоппера" РХ-61, шнек-дозатор з ворушителем ШДС-200-2,5, транспортер пересувний гвинтовий КВП-60, транспортер шнековий пересувний ТПШ-3М і т.д. Переважна більшість у всіх перерахованих машин та механізмів використовується великогабаритний шнек з кроком понад 120 мм.

Транспортування порошкових матеріалів різної фракції та щільності вимагає виконання великих обсягів транспортних та вантажних операцій. На одну тонну порошкової абразивної суміші доводиться від 7 до 9 тонн вантажно-транспортних робіт. Отже, на процеси транспортування порошкових матеріалів витрачаються величезні трудові та матеріальні ресурси [2].

У ряді наукових праць найбільш поширеною причиною експлуатаційних відмов машин у більшості випадків є знос та пошкодження робочих поверхонь деталей механізмів. У випадку зі шнековим конвеєром головною деталлю, яка при активній експлуатації піддається найбільшому зносу та фізичному дії, є шнек [2].

Шнек має низку конструкторських і технологічних переваг, таких як компактність, простота експлуатації і надійність, що зумовило його широке застосування в транспортуючих конвеєрах. Для докладного вивчення ступеня зносу робочих (гвинтової та циліндричної) поверхонь шнека проводився аналіз

експлуатаційних умов роботи та факторів, що впливають на їхню зносостійкість (рис. 1.2)[2].

Рис.1.2. Схема факторів, що впливають на зношування робочих поверхонь шнека [2].

Алгоритм роботи шнека транспортуючого конвеєра включає в собі захоплення абразивної суміші в завантажувальному механізмі, переміщення абразиву всередині кожуха та розвантаження у розвантажувальному механізмі. При цьому вантаж (абразив), що переміщається, змінює характер руху. При переміщенні абразиву різної щільності, фракції та маси по робочих поверхнях шнека, виникає пара тертя «абразивна суміш-шнек», і в результаті цього взаємодії відбувається значне зношування робочих поверхонь [2].

Охарактеризовано процес тертя та зносу деталі, який включає наступні фактори: вхідні, внутрішні та вихідні. При проведенні досліджень з оцінки та визначення сили тертя в даній роботі визначено необхідність в обліку наведених факторів, що утворюються при терті робочих поверхонь шнека та абразивної суміші, оскільки фрикційна пара «абразивна суміш-шнек» володіє власними характеристиками та фізико-механічними властивостями, які впливають на величину сили тертя та інтенсивність зношування [2].

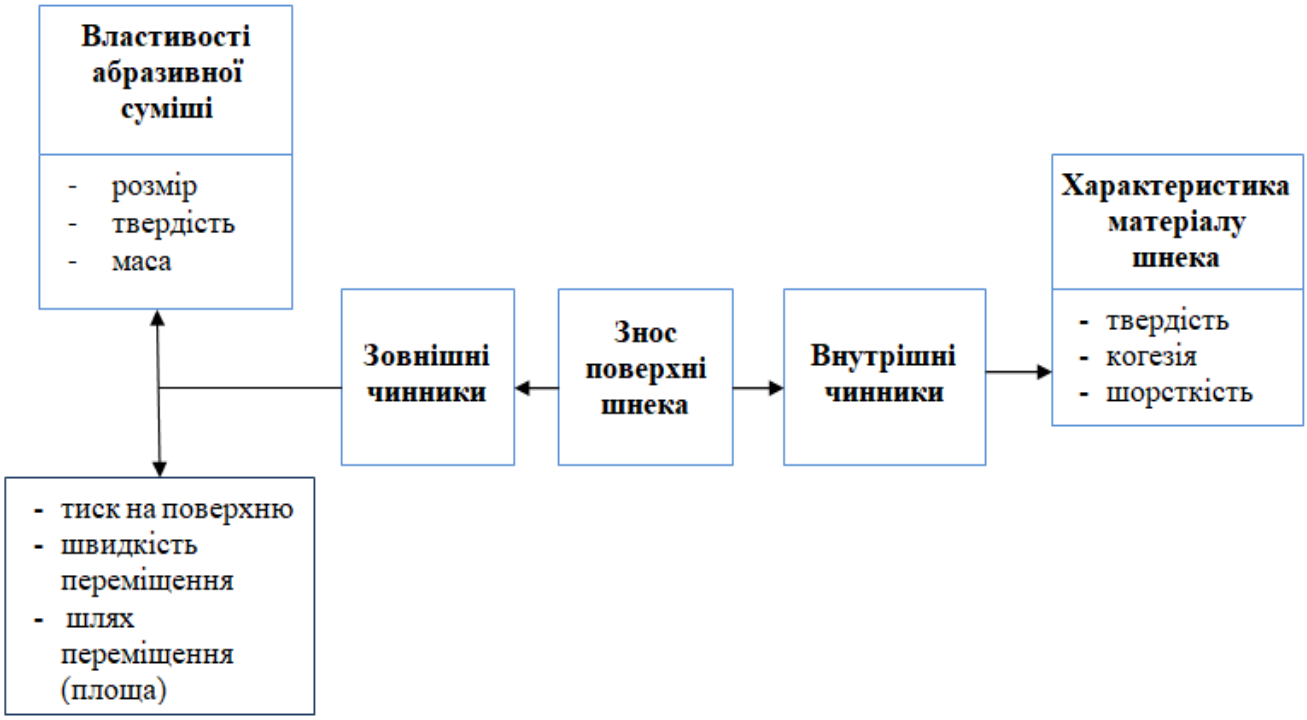


Рис. 1.3. Фактори, що впливають на знос поверхні шнека [2].

За підсумками аналізу робіт складено схему (рис. 1.3), що дозволяє зрозуміти, які фактори впливають на величину ступеня зношування робочих поверхонь деталі при їх терті з абразивним матеріалом таким як, наприклад, зернові культури або порошок [2].

Відомо, що при транспортуванні абразивних сумішей у шнековому конвеєрі виникають такі види зношування, як: механічне, корозійно-механічне та термомеханічне.

Для оцінки величини зношування необхідно враховувати контакт та вид зношування. У роботах був класифікований при терті контакт: мікрорізання, пружний контакт, пластичний контакт, адгезійна взаємодія, когезійний відрив.

Мікрорізання відбувається за умови, якщо контактна напруга при транспортуванні абразиву досягають граничних (руйнівних) значень, а саме коли йде порушення режиму обтікання робочої поверхні шнека абразивною сумішшю. Як правило, руйнування в даному випадку відбувається при першому контакті абразиву і робочої поверхні.

Пружний контакт має місце у випадках, коли адгезія не наводить у зоні контакту до напруг, які перевищують межу плинності. Даний вид зносу відбувається при багаторазовому контакті робочих поверхонь шнеку та абразивної суміші.

Пластичний контакт має місце у тих випадках, коли контактні напруги досягають межі плинності і абразив обтікає впроваджені виступи на робочій поверхні шнека.

Адгезійна взаємодія за своєю природою лише супроводжує втомним процесам. При цьому відбувається прилипання плівок, що покривають поверхню шнека.

Когезійний відрив відзначається при безпосередньому контакті абразивного матеріалу, що транспортується і робочих поверхонь шнека. При великих швидкостях транспортування абразивного матеріалу (високих оборотах обертання шнека) підвищується ступінь ударних навантажень на робочих поверхнях деталі, що в результаті призводить до відшаровування та виривання матеріалу з верхніх шарів матеріалу. За підсумками численні когезійні відриви порушують цілісність робочих поверхонь шнека, що призводить до некоректної роботи конвеєра, що транспортує, в цілому.

На основі проведеного аналізу контактів при терті було зроблено висновок, що знос шнека транспортуючого конвеєра характеризується пластичною деформацією поверхневих шарів металу, хімічною взаємодією з різними елементами зовнішнього середовища, тепловиділенням через щільний контакт транспортованої абразивної суміші (порошок, зернові культури і т.д.) та робочих поверхонь шнека, а також утворенням та руйнуванням плівок оксидів.
Залежно від механічного складу абразивної суміші, що транспортується, роль якої зазвичай виконують промислові порошки або зернові культури, шнек зношується по товщині, ширині, довжині, затуплюється, згинається й у результаті ламається. При цьому з підвищенням температурних показників у

зоні контакту абразивних включень та робочої поверхні шнека, величина зносу значно збільшується.

У ході експлуатації конвеєра відбувається поступове погіршення. фізико-механічних та експлуатаційних властивостей матеріалу, з якого виготовляються шнеки, що транспортують, зростання динамічних і термічних напруг. В результаті відбувається процес активного абразивного зносу робочих поверхонь деталі, що призводить до виникнення поломки конвеєра та зниження його працездатності.

На сьогоднішній день серійні шнеки для конвеєрів, що транспортують, виготовляють із сталей 20Х, 65Г, 45 і інші, які в загартованому стані мають твердість 37-43 HRC та задовільні показники відносного подовження δ = 6,5-7,2%, але невелика межа міцності σВ = 880-1080 МПа. Проте величини даних технологічних характеристик сталей повною мірою не забезпечують високий ресурс експлуатації шнеків Отже, виникає необхідність у зміцненні шнека шляхом термічної або механічної обробки робочих поверхонь шнека або нанесенням функціональних покриттів, що забезпечують підвищену зносостійкість.

З проведеного аналізу наукових праць випливає, що найпоширенішим видом зношування шнеків транспортуючих конвеєрів є абразивне. При цьому виникає висока ступінь концентрації контактних напруг, що піддає поверхневий робочий шар шнека інтенсивному руйнуванню.

Як показав статистичний аналіз, знос робочих поверхонь шнека наведеної групи обладнання варіюється від 0,1 мм до 5 мм. Напрацювання основних вузлів та деталей до заміни, а також результати техніко-економічного аналізу складових вузлів транспортуючого конвеєра наведено у таблицях 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1. Перелік деталей конвеєрів, що швидко зношуються.

№ р/р	Основні відомості	Обмеження експлуатаційний ресурс, час	Позначити рослина кінцева ресурс, час	Знос
1.	Вал гвинта і вал гвинта поверхня гвинтовий конвеєр	166-170	350	Абразивний
2.	Вал гвинта і вал гвинта пневматична поверхня гвинтовий насос	147-153	350	
3.	Вал гвинта і вал гвинта поверхня цегляний прес	140-164	350	

Таблиця 1.2. Техніко-економічний аналіз складових вузлів конвеєрна стрічка.

№ р/р	Конвеєрні стрічкові збірки, піддані зносу	Період робота, час	Продовження редагування, час	Середня вартість частини (вузол), тис. грн.
1.	Мотор редуктора	8500	0,5-0,75	10000
2.	Блок приводу	8000	0,25-0,5	5000
3.	Несучі опори	4000	1-1,5	3000
4.	Шнек	350	3-3,5	30000
5.	Жолоб із кожухом	термін погашення сервіс до списання	1-2	7000
	Завантаження труб і розвантаження	термін погашення сервіс до списання		
6.	Консоль		0,5-0,75	4000
			0,5-1	5000

Аналіз роботи показує, що характер впливу абразивний матеріал, а саме його багатопрофільні частинки, з робочими поверхня деталі дає розуміння, що за стирання тертя (контакт) відбувається в робочому середовищі (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3. Види абразивного зносу деталей машин.

№ р/р	Абразивні носії тертя	Умови зносу стирання
1.	У масових абразивних частинках	При транспортуванні в порошковій масі, що містить абразивні частинки
2.	Контактний абразив	Ковзні фрикційні кон'юговані частини з абразивні частинки в контакті
		Сполучені частини з тертям кочення з абразивними частинками в контакті
3.	Абразивна вода і газ	Тверді частинки в потоці рідини
		Тверді частинки в потоці повітря

Проаналізувавши зведені дані таблиці 1.1.-1.3. зроблено висновок, що гвинтова і циліндрична поверхня шнека конвеєра в процесі роботи активно зношуються і піддаються значній механічній дії в основному за рахунок контакту з конвеєрним абразивним матеріалом.

Проаналізувавши зведені дані таблиці 1.1.-1.3. зроблено висновок, що гвинтова та циліндрична поверхні шнека транспортуючого конвеєра в процесі експлуатації активно зношуються та піддаються значному механічному впливу переважно за рахунок контакту з транспортованим абразивним матеріалом.

Абразивне зношування зазвичай становить частки міліметрів, при цьому шнек вже не може забезпечити нормальне протікання технологічного процесу і повинен бути замінений. Для оцінки величини абразивного зносу шнека необхідно знати інтенсивність поширення зношування під час його експлуатації.

Розрізняють такі види інтенсивності абразивного зношування: при пружному контакті абразивної суміші та шнека; при пластичному контакт; при мікрорізанні; інтенсивність абразивного зношування, заснована на природі втоми руйнування поверхні шнека. Отже, величина інтенсивності абразивного зношування робочих поверхонь шнека, а також зносостійкість, в основному залежать від твердості та мікротвердості поверхні, а також від об'єму залучених до контакту тертя абразивних частинок та площі їх контакту поверхнею.

Конструктивними недоліками шнекових конвеєрів є: висока питома витрата та виділення енергії при транспортуванні абразивних фракцій, стирання та подрібнення матеріалів та підвищений знос робочих поверхонь шнека, що транспортує [3].

Під час експериментальних досліджень доведено, якщо спіраль встановлена під кутом 10…15° вниз по відношенню до осердя шнека, його продуктивність підвищується на 40…50 %, а зношування поверхні шнека має рівномірний характер зносу [3].

Однак впровадження пневмогвинтової установки в конструкцію шнекового конвеєра призведе до серйозного подорожчання всього пристрою, також виникне необхідність у забезпеченні додаткових ремонтних заходів пневмогвинтової установки та конвеєра в цілому [3].

Досліджувалися взаємодії транспортованого абразивного матеріалу із внесеним у конструкцію конвеєра оребреним кожухом. Проводився аналіз впливу числа заходів ребра встановленого кожуха на продуктивність та термін служби шнекового конвеєра, а також розглядалася можливість модернізації загальної конструкції [3].

Проаналізувавши результати, зроблено висновок, що в рамках серійних сільськогосподарських виробництв використання класичних шнекових конвеєрів, що транспортують, займає виправдане першорядне місце, а використання модифікованих пристроїв та механізмів на даний момент економічно недоцільно [3].

За підсумками проведеного аналізу встановлено, що на даний момент у сільськогосподарському виробництві надійніше та вигідніше використовувати технологічні способи підвищення терміну служби робочих поверхонь шнека, що істотно збільшить термін експлуатації конвеєрів агропромислових комплексів [3].

Для досягнення високих показників експлуатаційних характеристик шнека, що транспортує, широко застосовуються технологічні способи нанесення

функціональних покриттів на робочих поверхонь деталі. Узагальнена класифікація способів відновлення та зміцнення зношених поверхонь деталей представлено (рис. 1.4) [3].

Рис. 1.4. Способи відновлення та зміцнення деталей [3].

Нанесення гальванічних покриттів. Гальванічні покриття, які наносяться за рахунок електро- та хімічного осадження, відрізняються високою міцністю зчеплення між покриттям, що наноситься, і оброблюваною поверхнею деталі, а також дозволяють отримувати поверхні з широкого спектру композитних матеріалів. Гальванічні покриття за своїми експлуатаційними властивостями відрізняються високою термостійкістю, зносостійкістю, корозійною стійкістю [3].

Гальванічні покриття за всіх їх переваг мають необхідною міцністю та зносостійкістю тільки при малій їх товщині, тому не можуть використовуватися для відновлювальних операцій складно профільних поверхонь деталей [3].

Електроіскрове легування. Технологія електроіскрового легування заснована на формуванні шарів матеріалу з великим діапазоном фізико-хімічних властивостей, варіюючи електричними режимами. Технологія електроіскрове легування забезпечує підвищення твердості, корозійної стійкості, та інших триботехнічних характеристик деталі та її робочих поверхонь [3].

Недоліком електроіскрове легування є висока шорсткість нанесеного шару. Крім того, процеси нагріву в зоні імпульсного розряду є головною, причиною утворення в шарах залишкових напруг, що наносяться, що спричиняє зниження втомної міцності [3].

Лазерна обробка (наплавлення). Технологія нанесення покриття лазерною наплавкою заснована на нанесенні функціонального матеріалу на поверхню деталі із застосуванням висококонцентрованого потоку енергії - лазерного променя. Головні переваги цієї технології: забезпечення точно призначуваної кількості енергії, що вводиться на поверхню оброблюваної деталі, роздільне регулювання нагріву та плавлення основного та присадочного матеріалів, що наносяться [3].

Однак для застосування лазерної обробки необхідне спеціальне дороге обладнання та проведення великої кількості експериментальних досліджень з підбору матеріалу нанесення, що пов'язано з ймовірністю формування покриттів з високою втомною міцністю і залишковими напругами. Найбільш поширеними способами нанесення матеріалу із заданими експлуатаційними властивостями є газотермічна наплавка та напилення. Наплавлення та напилення переслідують дві технологічні цілі: відновлення геометрії та габаритних розмірів деталі, а також нанесення поверхневого шару із спеціальними експлуатаційними властивостями з метою продовження терміну служби механізму [3].

Розглянемо способи наплавлення деталей спеціального сільськогосподарського обладнання, які найчастіше застосовуються у ремонтних сервісах та цехах.

Наплавлення вкритими електродами. Цей технологічний процес наплавлення ведеться постійному струмі зворотної полярності. Переваги наплавлення покритими електродами: нанесення наплавлюваного матеріалу без обмежень товщини покриття та відсутність обмежень за габаритними розмірами наплавлюваних поверхонь деталей.

Недоліки наплавлення покритими електродами: відсутність контролю якості та властивостей наплавленого шару через попадання до нього елементів матеріалу оброблюваної деталі; значна деформація поверхні оброблюваної деталі за рахунок високої енергії наплавлення; не контрольованість кінематики процесу, що призводить до нерівномірного нанесення наплавлюваних матеріалів на поверхню деталі; складність наплавлення дрібно габаритних деталей.

Дугове наплавлення електродом в аргоні. Як джерело живлення використовуються спеціальні установки, оснащені осцилятором безконтактного збудження дуги. Як захисний газ використовується Аргон. Як електроди застосовуються вольфрамові прутки. Переваги: можливість отримувати наплавлений шар за рахунок хімічного складу присадного прутка. Недоліки: низька продуктивність, складність та дорожнеча обладнання для здійснення наплавлення.

Автоматичне наплавлення. Виконується суцільним дротом, порошковим дротом чи стрічкою. Дана технологія має велику продуктивністю, порівняно з перерахованими вище способами. Застосування в даній технології порошкових матеріалів суттєво підвищує діапазон легування. Переваги автоматичної наплавлення: висока продуктивність процесу, процес наплавлення не вимагає високої кваліфікації робітника. Недоліки: висока вартість обладнання, непридатність до наплавлення виробів складної форми.

Проаналізувавши основні види наплавлення матеріалу на поверхні оброблюваної деталі, зроблено висновок, що всі наведені технології мають такі недоліки, як складне і дороге обладнання, дефіцитні вихідні матеріали, низька

якість покриття. Крім того, істотним недоліком всіх видів наплавлення є сильне спотворення геометрії деталі.

Практично у всіх способах відновлення та зміцнення зношених поверхонь деталей застосовуються композитні матеріали. На сьогоднішній день композитні матеріали є перспективними. з погляду підвищення ресурсу деталей машин. Але їх застосування пов'язане з труднощами, такими як вибір складу порошку з необхідними функціональними властивостями для конкретної деталей.

На сучасному етапі недостатньо теоретичних положень про формування зносостійких композитних покриттів на поверхнях деталей машин, а також рекомендацій щодо конструкторсько-технологічного забезпечення їх нанесення. На даний момент найбільш перспективними у плані отримання якісних функціональних покриттів із композитних матеріалів є газотермічні способи та методи напилення.

Основними способами газотермічного на поверхні деталей машин є: плазмове напилення, газополум'яне напилення, дугова металізація, детонаційно-газове напилення і та інше.

Характерною рисою цих способів нанесення покриттів є відсутність розплавлення металу основи або мінімальний ступінь його оплавлення. Способи газотермічного напилення відрізняються більш високою продуктивністю порівняно з наплавленням, дифузійним насиченням та електроосадженням.

Деякі автори пропонують використання технологій, які здатні підвищити міцність зчеплення покриття з основою(Адгезію) на базі порошків ПГ-СР2, ПГ-СР3, ПГ-СР4 та ін. до 218-246 МПа.

Однак, це досягається введенням додаткових прийомів термічного впливу на поверхню, що наплавляється, що веде до виникнення термічних деформацій та просторового жолоблення деталей. Самі автори відзначають, що цей спосіб застосовується тільки до масивних об'ємним деталям, здатним до розсіювання теплового потоку. Зокрема, гвинтова поверхня шнека є тонким листом, привареним до валу. Відповідно, дані технології з додатковим термічним

впливом не можуть використовуватися для відновлення та зміцнення робочих поверхонь шнека.

На сьогоднішній день АПК під час відновлення та ремонту спеціальної техніки активно застосовуються технології газотермічного зміцнення. Враховуючи техніко-економічний порівняльний аналіз способів відновлення та зміцнення деталей машин (таблиця 1.4.), зроблений висновок, що актуальною технологією відновлення зношених поверхонь шнека транспортуючого конвеєра є плазмове напилення [3].

Плазмове напилення є логічним розвитком електродугового металізації. Використовуючи основу даної технології, а саме плазму, можна наносити багатофункціональне покриття майже з усіх відомих матеріалів, у тому числі з порошкових композитів [3].

Таблиця 1.4.Техніко-економічний аналіз способів відновлення деталей.

Характеристика способу	Зварювання	Загартування	Наплавлення	Напилення
Товщина оброблюваної деталі, мм	0,5-10	≥3	≥2	будь-яка
Міцність зчеплення покриття з основою	-	-	висока	знижена
Інтегральна температура основи, °С	висока (200-1000)	низька (200-300)	висока (200-1000)	низька (100-200)
Термічна деформація деталі	знижена	є	є	ні
Структурні зміни основи	є	є	значні	ні
Пористість покриття Збереження шорсткості поверхні	-	-	ні	ні
Підвищена твердість поверхні	-	так	ні	ні
Зносостійке покриття	-	так	так	так
Жароміцне покриття	-	-	так	так

Продовження таблиці 1.4. Техніко-економічний аналіз способів відновлення деталей.

Характеристика способу	Зварювання	Загартування	Наплавлення	Напилення
Діелектричне покриття	-	-	так	так
Збереження високої твердості основи	ні	так	обмежена	так
Проведення технічного процесу автоматично або вручну	так	тільки автоматично	так	так

Саме за допомогою плазмового напилення можна провести експериментальний підбір складу композитного матеріалу для напилення, а також розробити рекомендації щодо призначення раціональних технологічних режимів напилення одержаного композиту [3].

Висновки по розділу

В результаті проведеного аналізу зроблено такі висновки:

Встановлено, що на даний момент перспективною та актуальною технологією відновлення робочих поверхонь деталей машин та спеціального обладнання АПК, зокрема шнеків транспортуючих конвеєрів з кроком понад 120 мм є плазмове напилення.

Визначено основні фактори, що впливають на якість та властивості міцності зносостійких композитних покриттів:якісна підготовка поверхні нанесення покриття; розробка раціонального складу композитного матеріалу для напилення деталі спеціального призначення; призначення оптимальних технологічних режимів напилення.

Визначено, що покращення властивостей композитного матеріалу напилення можливе при впливі на технологічні параметри процесу напилення.

На підставі висновків було визначено мету та завдання дослідження, представлені у вступі.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТНОГО ПОКРИТТЯ

Міцність зчеплення покриття з основою є одним із основних властивостей, що характеризує якість нанесеного покриття. Фізичні основи міцності зчеплення визначаються головним чином дифузійними процесами з'єднання матеріалу підкладки і матеріалу, що напилюється.

На даний момент розроблено велику кількість руйнівних та неруйнівних методів для оцінки міцності зчеплення покриттів із основою. Сучасне обладнання індентування поверхні та сучасні оптичні профілометри дозволяють поєднати простоту існуючих методів оцінки міцності зчеплення покриття з основою (метод ґратчастих надрізів, метод визначення міцності при зворотному ударі, метод розтягування, метод вигину, метод олівця) з точним методом відриву за допомогою цифрової технології. Цей метод називається – «скретч тест».

Рис. 2.1. Макро Скретч Тестер Revetest Express.

У проведеному дослідженні міцність композитного зчеплення покриття з основою визначалася методом вимірювального дряпання (методом скретч-тестування) з ASTM D 2197, ASTM C1624, а також відповідно до міжнародних стандартів, ISO 19252:2008, ISO 20502.

Подряпини проводилися алмазним індентором конічної форми на установці – Макро Скретч Тестер Revetest Express (рис. 2.1), що виключає похибки, пов'язані із впливом орієнтації граней індентора.

Метод реалізував контрольоване дряпання індентором на вибраних ділянках зразків при заданому режимі навантаження та довжині подряпини. Наконечник індентора переміщався поверхнями зразків з постійною навантаженням 34 Н.

На сьогоднішній день в галузі вимірювання твердості та мікротвердості покриттів найбільш точним і зручним методом є вимірювання вдавлювання алмазного наконечника під дією статичного навантаження. Схема зазначеного методу наведено (рис. 2.2).

Твердість композитного покриття Hv (HRC) вимірювалася на твердомірі ПМТ-3 (рис. 2.3) при навантаженні 50 Н за ДСТУ (ISO).

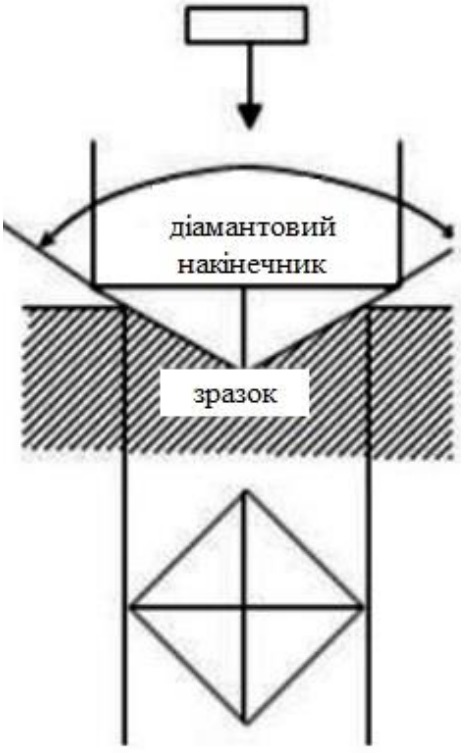


Рис. 2.2. Схема вимірювання твердості та мікротвердості.

Метод визначення твердості металів за Роквеллом полягає у вдавлюванні алмазного конуса в попередньо зашліфовану поверхню зразка. Твердість за

Роквеллом полягає у визначенні глибини вдавлювання. Метод Роквелла вважається більш оперативним, а в таких твердомірах як ПМТ-3 автоматизується як процес випробування, так і наступна обробка його результатів.

Мікротвердість композитного покриття (Па) також вимірювалася на твердомірі ПМТ-3 (рис. 2.3) при навантаженні 10 Н у поперечному перерізі зразка.

Рис. 2.3. Твердомір ПМТ-3.

Метод визначення мікротвердості покриття полягає в наступному: алмазний наконечник у формі правильної чотиригранної піраміди (рис.2.2) вдавлюють у ділянку зразка під дією навантаження. Після видалення навантаження вимірюють діагоналі квадратного відбитка, що залишився на поверхні зразка. Експериментальні вимірювання проводились у 15 точках, а потім проводилося обчислення мікротвердості за середньоарифметичним результатом вимірів.

За допомогою рентгеноструктурного та металографічного аналізу визначався фазовий склад покриття та напруги першого та другого роду для композитного покриття.

Металографічний аналіз проводився з використанням оптичного мікроскопа Axiovert 40 MAT (рис.2.4). З метою виявлення структурних

складових композитного покриття мікрошліфи досліджували без попереднього травлення.

Рис. 2.4. Оптичний мікроскоп Axiovert 40 MAT

Хімічний склад покриття досліджувався на іскрових оптикоемісійних спектрометрах PMI MASTER Pro (рис. 2.5 а) та ДФС-500(рис.2.5 б).

а) б)

Рис. 2.5. Оптико-емісійні спектрометри PMI MASTER Pro та ДФС-500.

Експериментальні випробування зразків із нанесеним покриттям на абразивне зношування проводилися на установці – машина тертя СМЦ-2 (рис.2.6).

Показник зносостійкості нанесеного покриття, рівний відношенню змін маси еталона та зразка, визначався за результатами трьох випробувань. Як зразок було прийнято покриття деталі до напилення.

Використовувався абразивний матеріал – електрокорунд зернистим. 16-П з відносним вмістом вологи не більше 0,15%. Для оцінки зносостійкості використовувалися прецизійна система для вимірювання шорсткості, контуру та 3D-топографії складнопрофільних деталей, профілактограф та аналітичні ваги.

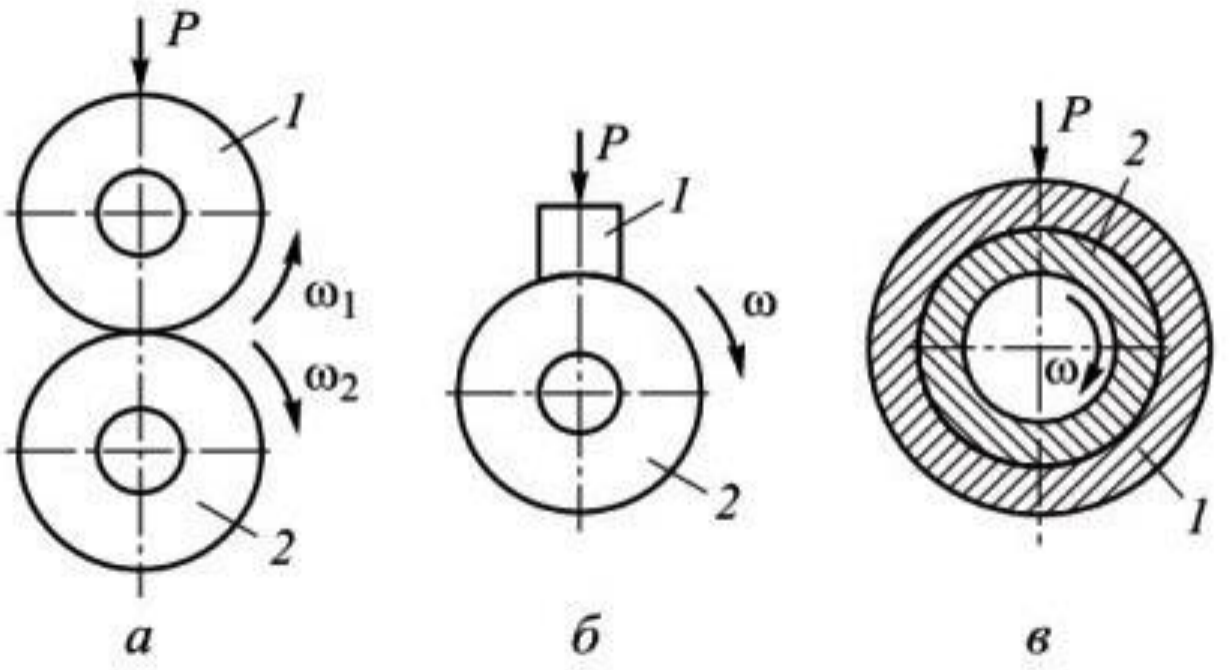


Рис. 2.6. Схема моделей взаємодії фрикційних пар, що реалізуються на машині тертя СМЦ-2; а - диск-диск; б - диск-колодка; в – вал-втулка; 1 – зразок; 2 – контртіло; Р – навантаження.

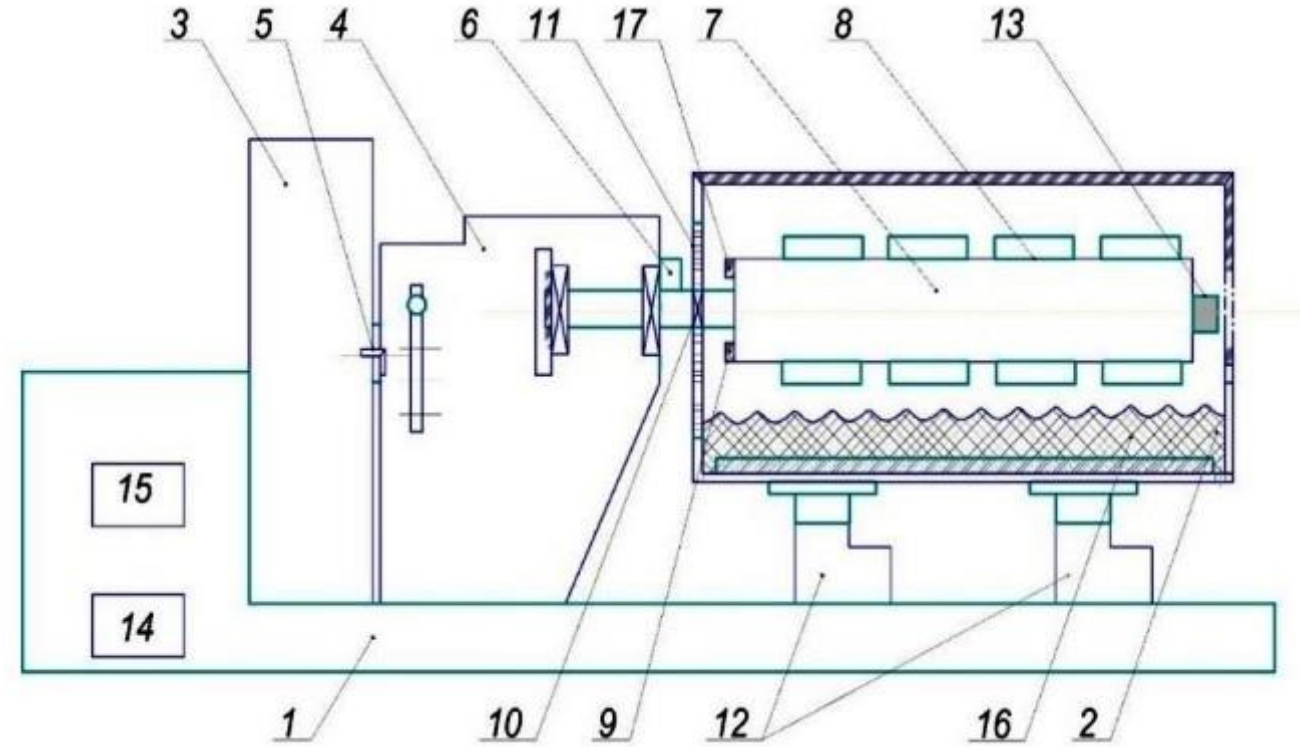


Рис. 2.7. Машина для випробування деталей на абразивне зношування.

Структурна схема машини для випробувань деталей на абразивний знос у варіанті виконання з пневмоциліндром та віброзбудником наведено на (рис.2.7), де: 1 – станина, 2 – ванна з абразивною сумішшю, 3 - токарний верстат 16К20, 4 - коробка передач, 5 - муфта, 6 - лічильник оборотів, 7 - ротор, 8 - зразки, що випробовуються, 9 - датчик сили, 10 – підшипник, 11 – кожух, 12 – пневмоциліндр, 13 – віброзбудник, 14 – блок управління, 15 – пульт введення даних, 16 – абразивна підкладка, 17 – датчик вібрації.

Експлуатаційні випробування шнеків транспортуючих конвеєрів проводилися з метою визначення показників їхньої довговічності. У конвеєрі встановлювалися нові та відновлені шнеки, які мали геометричні параметри, що відповідали вимогам технічних умов.

При експлуатаційних випробуваннях досліджувалися такі технічні параметри: зносостійкість робочих поверхонь шнеків, відновлених плазмовим напиленням композитним матеріалом; зносостійкість шнеків у порівнянні з новим (відносна зносостійкість та порівняльна довговічність досліджуваних шнеків); вплив зносу на техніко-економічні показники конвеєра

Випробування проводилися у чотири етапи:

1-й етап. Розробка методики проведення досліджень та планів спостережень.

2-й етап. Організація спостережень за конвеєрами у процесі проведення експлуатаційних випробувань Проміжний контроль зносу гвинтової та циліндричної поверхонь шнека в ході випробувань.

3-й етап. Мікрометраж деталей конвеєрів при знятті їх з експлуатаційних випробувань.

4-й етап. Обробка отриманих первинних даних та складання висновків та висновків.

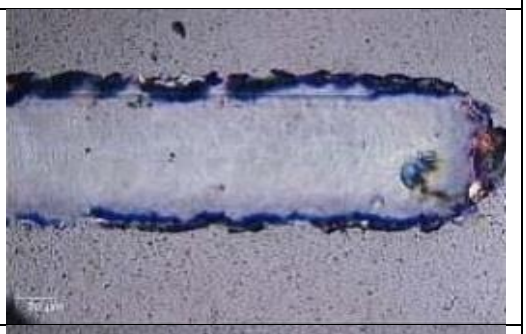
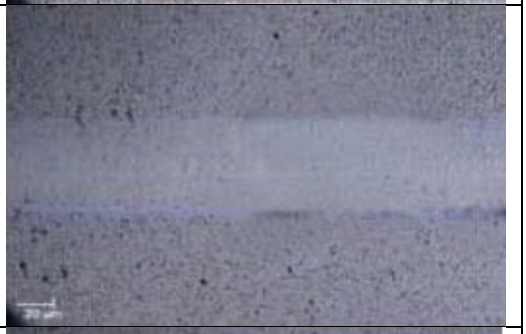
Висновки по розділі

В другому розділі магістерської роботи розроблено положення загальної методики, а також застосовано методики для оцінки технічних характеристик композитного покриття, нанесеного на робочі поверхні шнека. Підібрано спеціальне обладнання, яке дозволяє наносити покриття за допомогою плазмового напилення на робочі поверхні шнека транспортуючого конвеєра. Розроблено установку для напилення композитних покриттів на поверхні деталей машин, технічною особливістю якої є забезпечення високої точності переміщення плазмотрону щодо оброблюваної деталі, що призводить до формування покриття з високою міцністю зчеплення з основою. Розроблено машину для випробування деталей на абразивний знос, що дозволяє проводити у лабораторних умовах уточнений аналіз зносостійкості покриття поверхні деталей, зокрема шнека.

РОЗДІЛ 3
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

З метою підтвердження теоретичних досліджень про міцність зчеплення покриття з основою було проведено дослідження адгезійної міцності методом скретч тестування.

Таблиця 3.1. Результати досліджень міцності зчеплення покриття з основою.

№ зразка	Тип покриття	Навантаження, Н	Зовнішній вигляд покриття
1	ПР-НХ17СР4	34	
2	ПР-НХ17СР4+18%TiC	34	
3	ПР-НХ17СР4+23,5%TiC	34	
4	ПР-НХ17СР4+30%TiC	34	

У таблиці 3.1. представлені зображення подряпини на досліджуваних покриття при однаковому навантаженні. Видно, що найбільші сліди руйнування спостерігаються у покриття порошку ПР-НХ17СР4, що супроводжується збільшенням акустичної емісії при цьому навантаженні. Потім у міру підвищення міцності зчеплення покриття з основою слід покриття ПР-НХ17СР4+30%TiC, покриття ПР-Х17СР4+18%TiC та покриття ПР-НХ17СР4+23,5%TiC, у якого практично не спостерігалося руйнування. Крім того, біля покриттів № 1, 2, 4 відбувалося когезійне руйнування шляхом розтріскування в площині, перпендикулярній до напрямку зростання покриття від краю, що виражалося в утворенні тріщин усередині подряпин при заданому навантаженні. Слід зазначити, що покриття № 3 тріщин не спостерігалося протягом усього випробувань.

Дослідження поперечного шліфу покриттів показало, що наявність тріщин у стандартному покритті знижує загальний ресурс виробу, так як тріщина має можливість поширення в основний метал під покриттям, що зрештою призводить до руйнування деталі. Покриття ПР-НХ17СР4+23,5% TiC не утворює тріщин при нанесенні та експлуатації протягом усього випробувань.

На підставі вивчення даних досліджень для деталей транспортуючих пристроїв, що пройшли відновлення плазмовим напиленням функціональних матеріалів, однією з основних характеристик, що забезпечують надійну роботу, є твердість одержуваних покриттів, величина якої залежить від багатьох факторів.

Виходячи з вищевикладеного, було проведено регресійний аналіз, де функцією відгуку рівняння регресії була обрана твердість покриття, Hv (HRC).

Твердість вимірювалася на зразках за методикою, описаною у розділі 2. Зовнішній вигляд поверхні зразка після виміру твердості представлений (рис. 3.1).

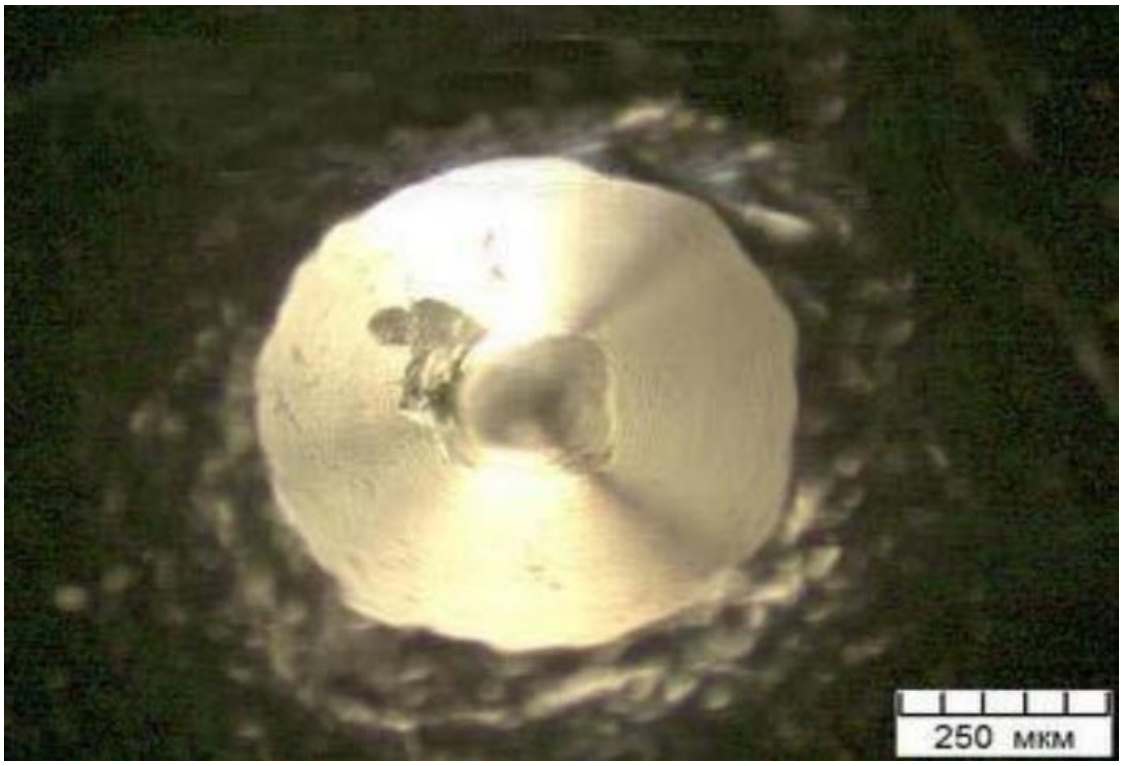


Рис. 3.1. Поверхня зразка після вимірювання твердості.

В результаті області варіювання незалежних змінних були обрані діапазони варіювання технологічних режимів напилення.

Для вивчення впливу режимів напилення на твердість одержуваних покриттів застосовувався метод регресійного аналізу, для цього на підставі експериментальних даних була побудована матриця планування, що містить залежну та незалежні змінні.

Однією з умов цього методу є припущення про функціональну незалежність змінних, що варіюються. Для оцінки цього положення проводився кореляційний аналіз.

Аналізуючи попередній експеримент та матриці коефіцієнтів парної кореляції, було зроблено висновок необхідність включення модель таких факторів досліджуваного процесу, як: струм дуги плазмотрона, дистанція напилення, масова витрата матеріалу, що напилюється. Інші фактори процесу виявилися не значущими або мультиколінеарними.

В результаті проведеного кореляційного аналізу було обрано наступні незалежні змінні та області їх варіювання (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2. Незалежні змінні та області їх варіювання.

Фактор	Нижній рівень	Середній рівень	Верхній рівень
X_1	200	225	250
X_2	50	100	150
X_3	0,3	0,4	0,5

У ході підбору математичної моделі, яка найбільш точно описує досліджуваний процес, зрозуміло, що найкраще визначає досліджуваний процес лінійна модель з вільним членом, так як для неї коефіцієнт детермінованості має найбільше значення.

Отримана модель піддавалася перевірці на адекватність згідно критерієм Фішера. Модель вважалася адекватною, якщо $F_p < F_{кр}$. Для отриманої моделі ця умова виконується, отже, рівняння регресії адекватно описує вплив основних факторів розробленого процесу на твердість одержуваних покриттів.

Ефект	Оцінка параметрів (Таблиця даних)									
	Сигма-обмежена параметризація									
	Hv	Hv	Hv, t	Hv, p	-95,00%	95,00%	Hv, Beta	Hv, B	Hv, p	-95,00%
Св,член	65,0154	0,030331	2143,245	0,000000	64,9475	65,0775				
I, A	0,55425	0,030331	18,28	0,000000	0,48989	0,61854	0,830488	0,045358	0,734122	0,926864
I, мм	0,32098	0,030331	10,588	0,000000	0,25658	0,38525	0,480809	0,045358	0,384450	0,577221
m	0,10452	0,030331	3,443	0,003414	0,03988	0,16853	0,156107	0,045358	0,059749	0,252123
I,A*,мм	-0,03762	0,030331	-1,242	0,234218	-0,10190	0,02690	-0,0562	0,045358	-0,15257	0,041120
I,A*m	-0,54187	0,030331	-1,797	0,093121	-0,11853	0,01024	-0,08118	0,045358	-0,17756	0,015221
I,мм*m	0,06260	0,030331	2,070	0,056012	-0,00190	0,01268	0,093671	0,045358	-0,0028	0,19004
I,A*I,мм*m	0,03760	0,030331	1,255	0,234285	-0,02700	0,10180	0,056199	0,045358	-0,040200	0,152567

Залежні змінні	SS моделі та SS залишків (Таблиця даних)										
	R	R2	R2	SS	cc	MS	SS	cc	MS	F	p
Hv	0,98346	0,96714	0,95298	10,3331	8	1,47624	0,35344	17	0,22193	66,8448	0,000000

Рис.3.2. Результати розрахунку покрокової множинної регресії.

В результаті розрахунку покрокової множинної регресії (рис. 3.2) із застосуванням пакету наукових підпрограм «Statistika» отримано рівняння в кодованих значеннях, що описує залежність твердості від досліджуваних факторів.

$$Hv=65,01+0,55I+0,32l+0,1-0,03I -0,05Im+0,06\ Im+0,04Ilm \quad (3.1)$$

Виявлено, що залежність твердості від досліджуваних факторів лінійний, а зв'язок між ними сильний – множинний коефіцієнт кореляція досягає значення 0,98. У ході роботи з аналізу кореляційної матриці, бачимо, що за ступенем впливу на твердість шару, що напилюється, досліджувані фактори розташувалися в порядку спаду в наступній послідовності: сила струму, дистанція напилення, масова витрата матеріалу, що напилюється.

Перевірка коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента, показала, що це коефіцієнти регресії, крім їх взаємодій виявилися значними, обчислені значення критерію Стьюдента виявилися більше критичного $t_{крит.} = 2776$.

На практиці зручніше користуватися регресійним рівнянням у розкодованому вигляді, дозволяє безпосередньо розраховувати технологічні параметри нанесення покриттів Перейдемо в отриманому регресійному рівнянні від кодованих до натуральних значень.

Отримуємо

$$Hv=59,02+0,022I+0,0064l+m \quad (3.2)$$

Для технологічних розрахунків зручніше користуватися тривимірними діаграмами у натуральних значеннях, представленими на рисунках 3.3-3.5.

Наведені діаграми дозволяють на стадії проектування технологічного процесу прогнозувати твердість одержуваного покриття залежно від режимів нанесення.

ЗМ Графіки поверхонь для Hv та I,A та I,мм

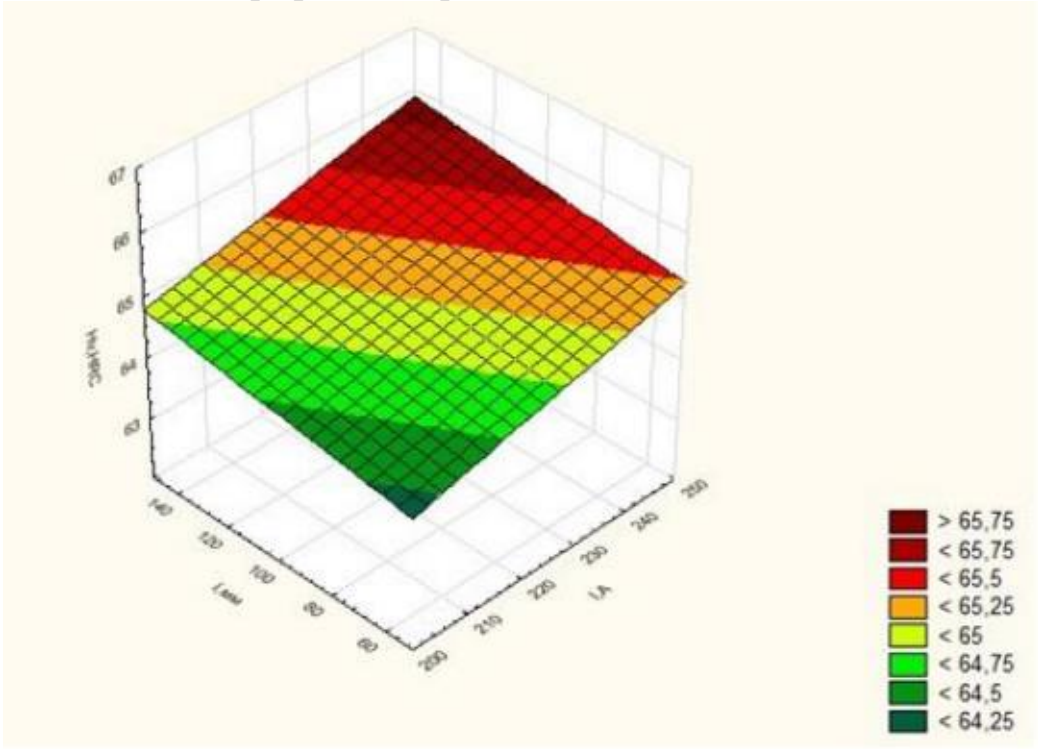


Рис.3.3. Тривимірна діаграма у натуральних значеннях №1.

ЗМ Графіки поверхонь для Hv та I,A та *m*

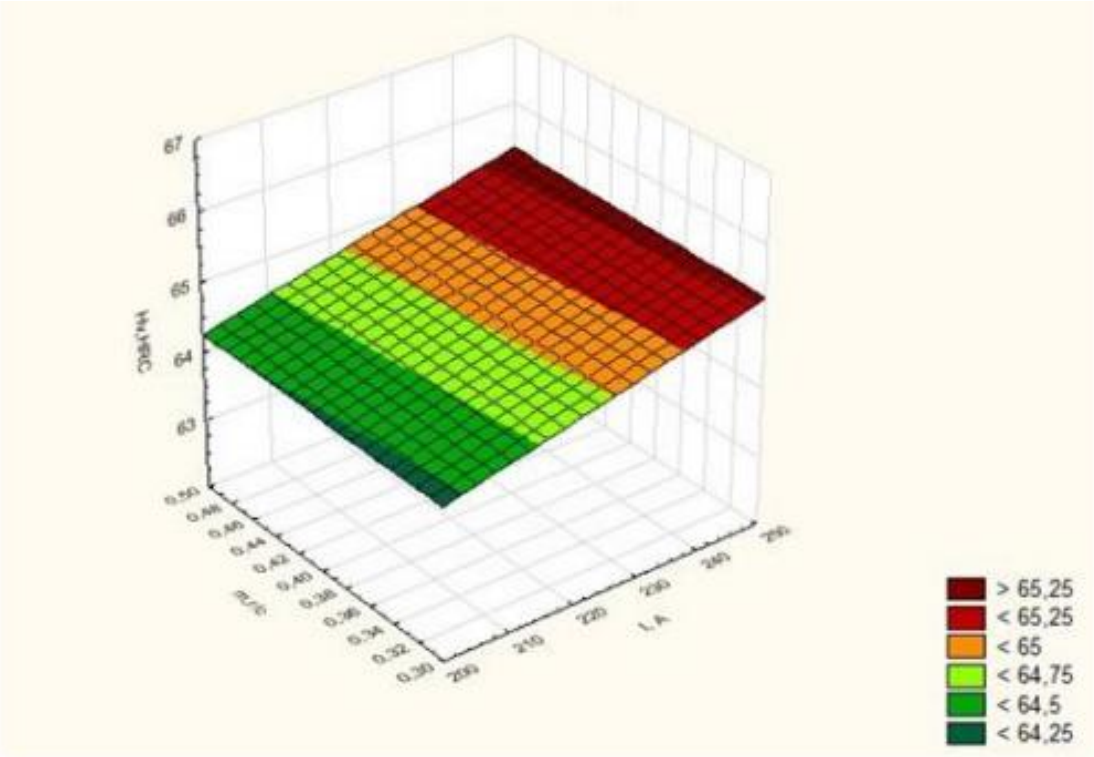


Рис.3.4. Тривимірна діаграма у натуральних значеннях №2.

ЗМ Графіки поверхонь для Hv та l,мм і m

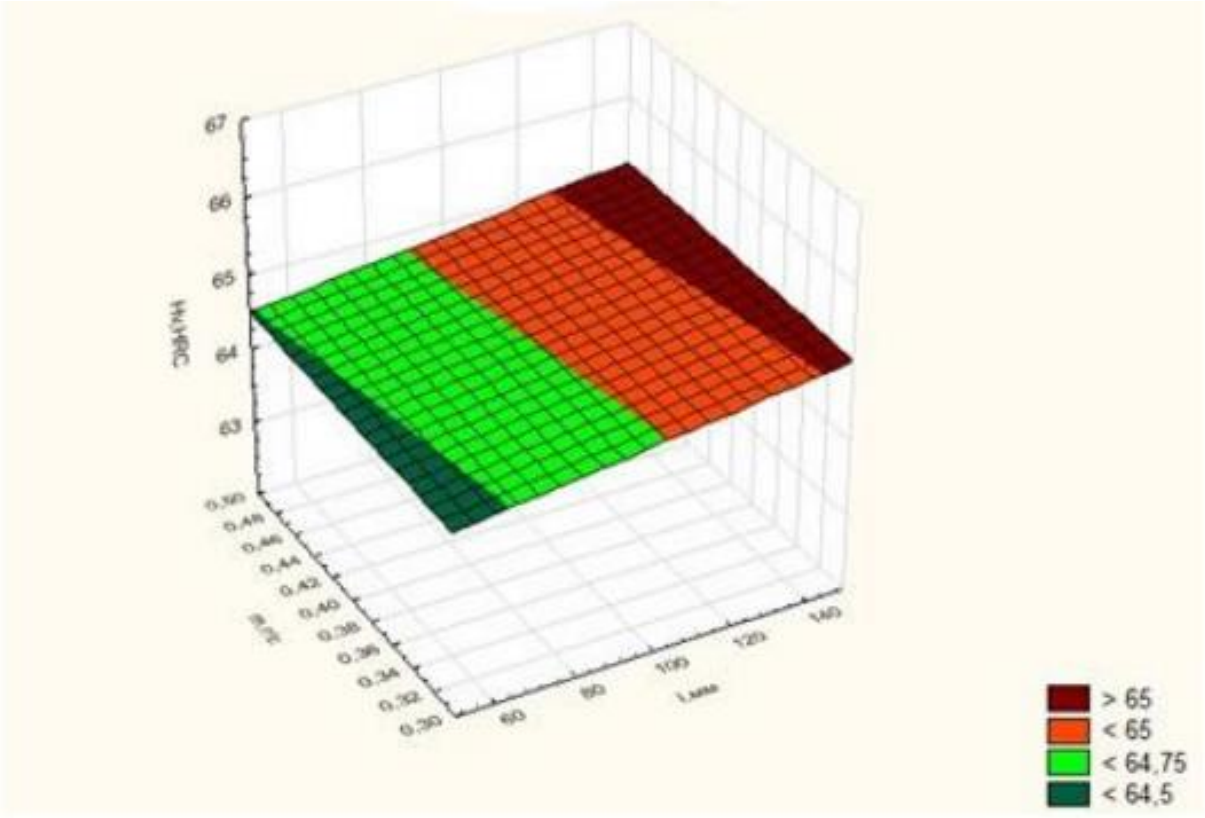


Рис.3.5. Тривимірна діаграма у натуральних значеннях №3.

На (рис. 3.6) представлено графічну інтерпретацію регресійного рівняння (3.2) у вигляді функції бажаності, що дозволяє візуально оцінити характер та ступінь впливу залежних змінних процесу на значення досліджуваного параметра.

Поверхня/контури бажаності; Метод: Квадратичне припасування.

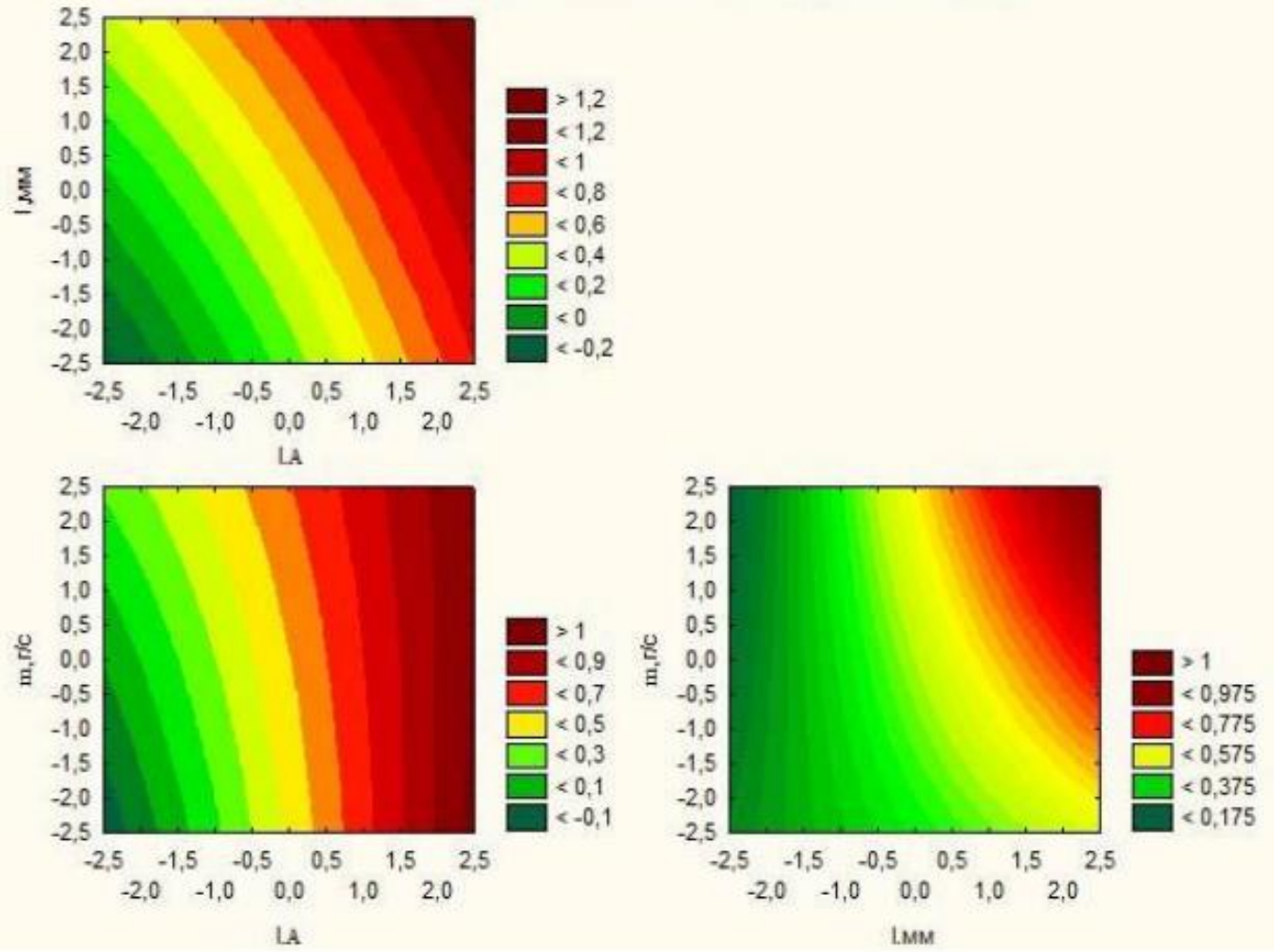


Рис. 3.6. Функція бажаності.

Вимірювання мікротвердості проводилося відповідно до методики, викладеної у розділі 2. Зовнішній вигляд зразка, підданого дослідженням, показано (рис. 3.7).

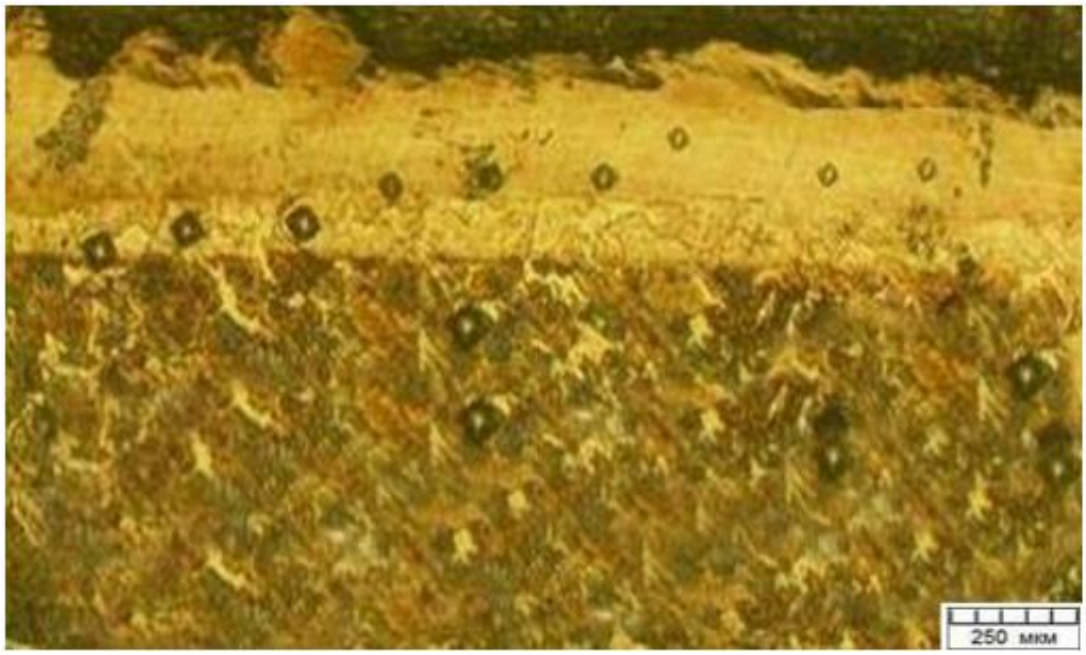


Рис.3.7 – Зовнішній вигляд зразка після вимірювання на мікротвердість.

Відстань від поверхні, мм	ПР-НХ17СР4	ПР-НХ17СР4 + TiC	
		легув.	композ.
0,05	10,57	12,14	15,11
0,1	10,61	12,21	15,08
0,15	10,55	11,98	14,91
0,2	10,46	11,59	14,77
0,25	10,18	11,27	14,63
0,3	9,93	11,02	14,22
0,35	9,51	10,64	13,98
0,4	8,78	10,26	13,74
0,45	7,82	9,82	13,41
0,5	7,02	9,23	13,23
0,55	6,12	8,48	12,96
0,6	5,41	7,61	12,28
0,65	1,82	6,62	11,89
0,7	3,74	5,93	11,12
0,75	3,08	5,24	10,74
Середнє	7,906778	9,602778	13,47244

Таблиця 3.3. Результати вимірювань мікротвердості.

На (рис. 3.8) представлено графічну інтерпретацію проведених досліджень. З (рис. 3.8) видно, що мікротвердість всіх типів покриттів зменшується за

глибиною шару. На графіку представлені апроксимаційні залежності зміни мікротвердості для кожного з досліджуваних типів покриття.

Аналіз даних (таблиця 3.3) дозволяє бачити, що мікротвердість композитних покриттів із ПР-НХ17СР4+TiC у 1,4 рази вище, ніж мікротвердість легованих покриттів ПР-НХ17СР4+TiC та у 1,7 рази вище, ніж мікротвердість стандартних покриттів ПР-НХ17СР4. Це пояснюється наявністю твердих включень TiC у покритті.

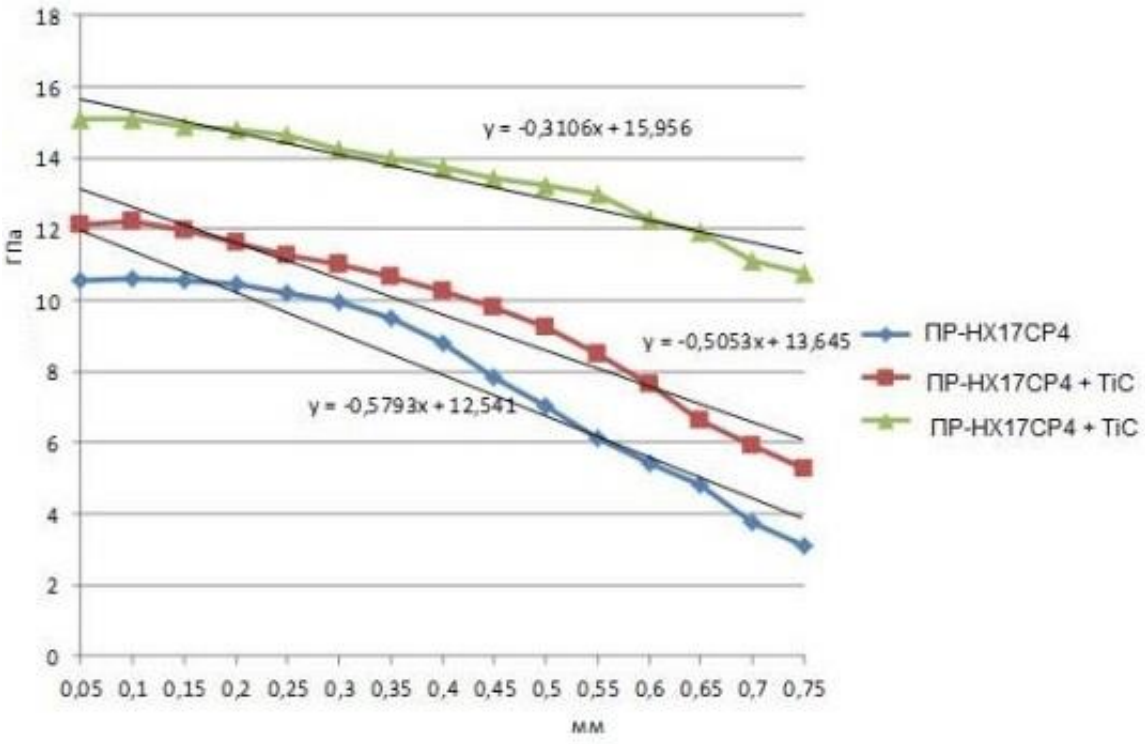


Рис. 3.8. Графічна інтерпретація проведених досліджень мікротвердості покриттів.

З графіка, зображеного (рис.3.8), видно, що найкращої рівномірністю мікротвердості покриття залежно від його товщини має композитне покриття з ПР-НХ17СР4+TiC. Порівняно з ним, швидкість зміни мікротвердості залежно від його товщини вище у легованих покриттів ПР-НХ17СР4+TiC у 1,64 рази, а у стандартних покриттів ПР-НХ17СР4 у 1,87 раза.

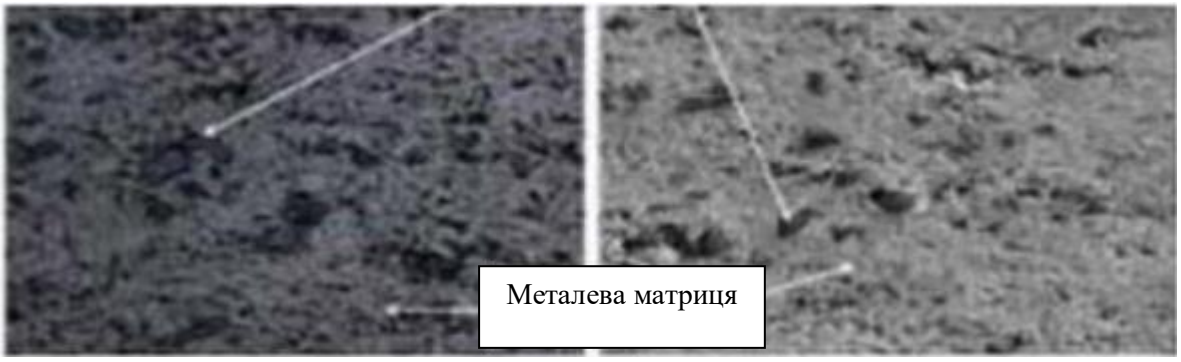
Високе значення мікротвердості та її мала швидкість падіння по глибині шару покриття можуть бути пояснені наявністю локальних матриць наклепу в покритті, створюваними включеннями TiC. Крім того, нещільна упаковка

структури покриття, що сприяє утворенню значної кількості оксидів, які на практиці дають додатковий внесок у збільшення загальної мікротвердості покриття.

Як показали результати випробувань на зносостійкість покриттів значний вплив має будова структури покриття.

Структура покриття з матеріалу ПР-НХ17СР4+23,5% TiC, представлена на (рис.3.9), складається з нікелевої основи з рівномірно розташованими дрібними включеннями титану карбіду, які знаходяться з нею у досить міцному зв'язку. В результаті тертя про закріплений абразив відбувається зміцнення нікелевої основи за рахунок зміщення та вмивання включень карбіду титану. Підтвердженням цього факту є підвищення твердості покриття порівняно з вихідною після тертя абразиву.

Частини TiC, що не розплавилися.



а) б)

Рис. 3.9. Структура композитного покриття а) – оптична мікроскопія; б) растрова електронна мікроскопія.

Як показали металографічні дослідження, у зразків із класичним покриттям ПР-НХ17СР4, що використовується для зміцнення контактних поверхонь деталей, твердість зменшується від периферії углиб зразка. У зв'язку з цим, як тільки відбувається зношування верхнього шару покриття, оголюється менш зміцнений шар та інтенсивність зношування різко зростає. На відміну від цього, зразки з покриттям композитним матеріалом ПР-НХ17СР4+23,5% TiC мали значно менший знос у зв'язку. з тим, що структура нанесеного шару по

глибині мала твердість майже таку ж, як і верхній шар. Тому в міру зношування верхніх шарів твердість покриття практично не змінювалася і інтенсивність пошарового. зносу мало змінювалася.

На (рис.3.10) представлений поперечний шліф з нанесеним покриттям ПР-НХ17СР4+23,5% TiC.

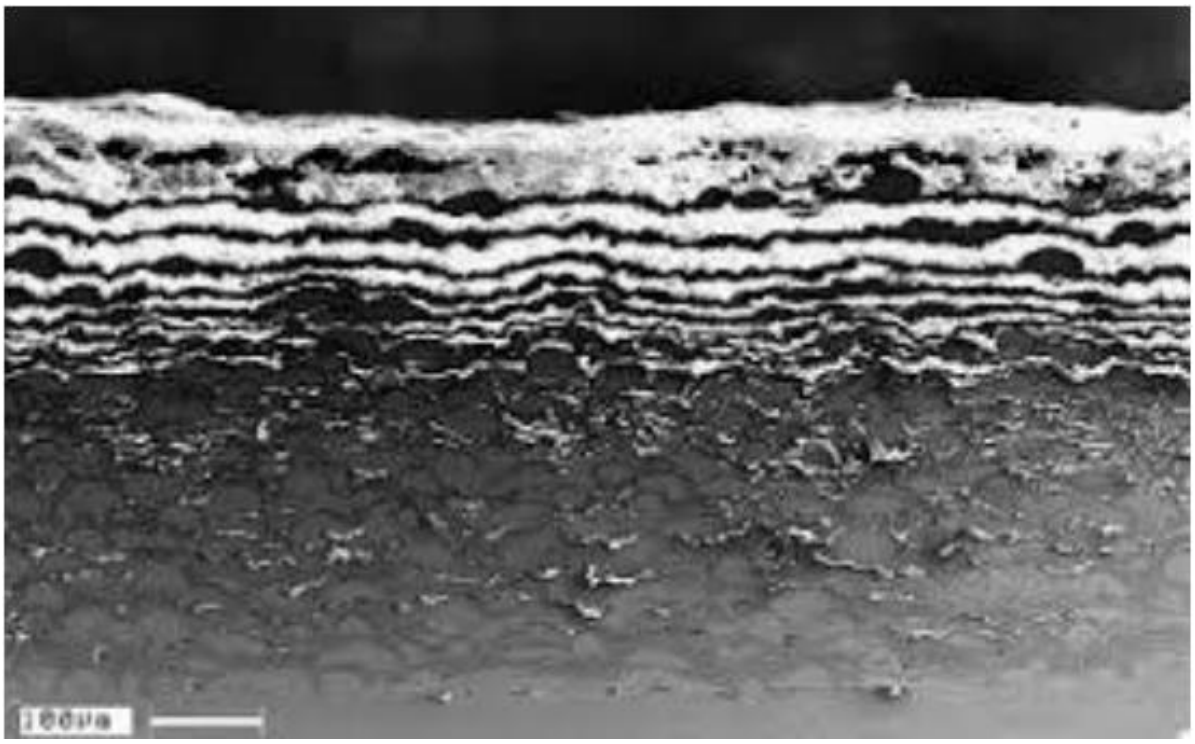
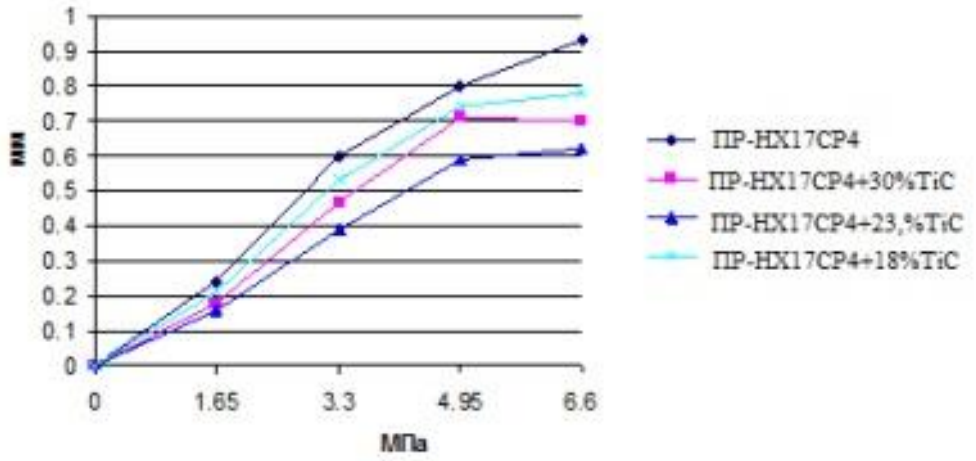


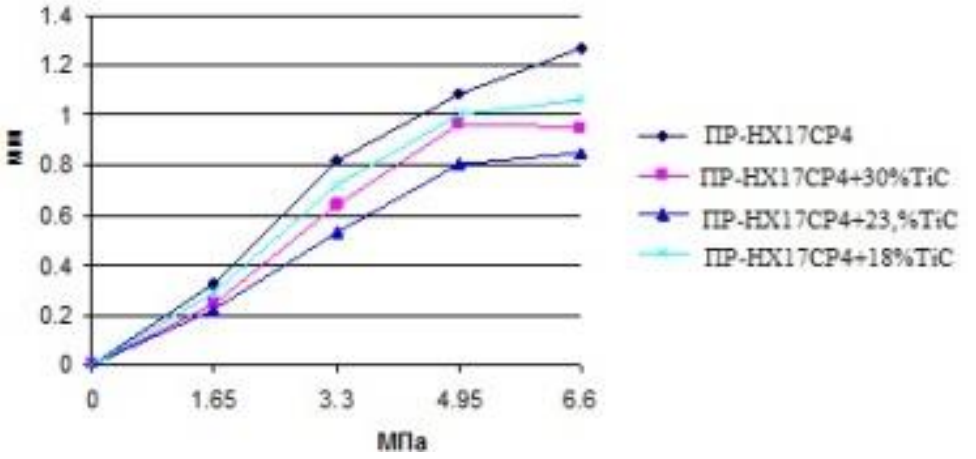
Рис. 3.10. Поперечний шліф покриття ПР-НХ17СР4+23,5% TiC.

На (рис. 3.10) чітко видно характерна шарувата структура покриття, спричинена особливістю технології її нанесення. На всіх досліджуваних зразках відшарування покриттів від основи немає. Дефекти нанесеного шару у вигляді тріщин, локальних відшарувань, великих пор на зразках не виявлено Мікрошліф характеризується високою щільністю, рівномірністю структури, низькою пористістю, відсутністю тріщин. та високою міцністю зчеплення покриття з основою.

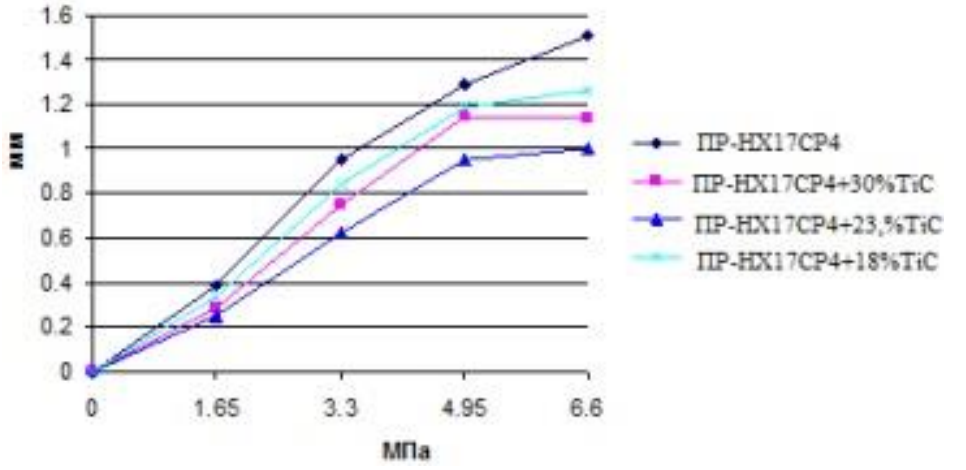
На рис.3.11 (а, б, в) представлені графіки, що виражають залежність зношування випробуваних зразків від тиску при різних швидкостях ковзання.



а)



б)



в)

Рис. 3.11. Залежність зносу зразків від навантаження та швидкості обертання диска: а) – 0,3 м/с; б) – 0,5 м/с; в) – 0,7 м/с.

З Рис.3.11 видно, що для всіх випробуваних покриттів зі збільшенням тиску та швидкості ковзання знос зростає, однак у покриття ПР-НХ17СР4+23,5% TiC меншою мірою, ніж в інших. Для кожного досліджуваного типу покриття було проведено три повторні досліди з різними зразками. Паралельно було проведено дослідження зносостійкості зразків із сталі 20Х. Результати досліджень представлені у таблиці 3.4.

Матеріал покриття	Маса зразка до випробувань, г	Час випробування, хв.	Маса зразка після іспиту, г	Втрата маси, г	Середня втрата маси, г	Відносна зносостійкість
Сталь 20Х	102.72	10	102.640	0.072	0.072	1
	103.45		103.38	0.08		
	104.32		104.249	0.071		
ПР-НХ17СР4	107.87	10	107.807	0.055	0.054	1.349440005
	108.63		108.579	0.053		
	102.35		102.296	0.056		
ПР-НХ17СР4+18%TiC	105.67	10	105.624	0.048	0.047	1.901785825
	104.29		104.243	0.049		
	107.84		107.796	0.046		
ПР-НХ17СР+23,5%TiC	108.26	10	108.224	0.039	0,036	3.39722621
	109.84		109.817	0.035		
	110.26		110.849	0.038		
ПР-НХ17СР+30%TiC	110.88	10	110.848	0.043	0.044	2.7375
	109.64		108.506	0.046		
	107.28		107.248	0.044		

Таблиця 3.4. Незалежні змінні та області їх варіювання.

Проводячи аналіз зносу досліджуваних покриттів, можна стверджувати, що зносостійкість композитного покриття ПР-НХ17СР4+23,5%TiC перевищує аналогічний показник у покриття ПР-НХ17СР4 у 2,52 рази, покриття ПР-НХ17СР4+18%TiC у 1,79 рази, у покриття ПР-НХ17СР4+30%TiC у 1.25.

Таким чином, теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що зносостійкість композитного покриття зростає при збільшені вмісту в ньому наповнювача у вигляді карбіду титану до 23,5%, а потім знову починає знижуватися.

Такий екстремальний характер залежності зносостійкості композитного покриття від вмісту наповнювача у вигляді TiC можна пояснити наступним

чином. Використання добавок TiC у покритті дозволяє зменшити залишкові напруги в них, які наводять до руйнування при застосуванні сумішей стандартних порошків. Однак при значному вмісті TiC в порошку, що подається до напилення, спостерігається зниження зносостійкості покриття. Отримані результати можна пояснити тим, що неповне проплавлення частинок через значну різницю їх теплоємності по відношенню до порошку, що формує матрицю, призводить до крихкості та збільшення пористості. Тим самим знижується мікротвердість покриття та його зносостійкості.

Спираючись на отримані результати дослідження зносостійкості композитного покриття ПР-НХ17СР4+23,5%TiC на робочих поверхнях деталі. Експлуатаційний ресурс шнека і конвеєра в цілому зростає у 1,6-1,7 раза.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті аналізу визначено нанесення композитних покриттів плазмовим напиленням на зношені поверхні деталі з метою її відновлення та збільшення ресурсу експлуатації представляє науковий та практичний інтерес в галузі відновлення транспортної техніки та спеціального обладнання АПК.

Розроблено установку для нанесення композитних матеріалів на поверхні деталей плазмовим напиленням, що забезпечує високу точність переміщення плазмотрону щодо відновлюваної деталі поверхні. Отримано аналітичні залежності кінематичних режимів плазмового напилення від геометричних особливостей поверхонь шнека, товщини композитного покриття і температури нагрівання робочих поверхонь.

Експерементальні дослідження підтвердили коректність теоретичних положень, отримано регресійні моделі залежності міцності зчеплення покриття з основою від розміру та концентрації наповнювача композитного матеріалу напилення. Також, отримано регресійні моделі залежності міцності зчеплення покриття з основою та твердістю покриття від технологічних режимів напилення робочих поверхонь шнека.

Встановлено, що зносостійкість отриманого композитного покриття у 2,52 рази перевищує зміцнювальний шар легованого покриття з порошку ПР-НХ17СР4 та у 3,39 рази поверхневий шар деталі із сталі 20Х без функціонального покриття.

Отримані результати дозволяють рекомендувати розроблену технологію відновлення та склад композитного матеріалу для відновлення зношених поверхонь композитного матеріалу для відновлення зношених поверхонь шнеків, які дуже активно використовуються на підприємствах АПК.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мельник О.П., Добранський С.С. Відновлення робочих поверхонь шнека транспортуючих пристроїв плазменним напиленням зносостійкого композитного покриття. *Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»*, 5 квітня 2023 року Житомир: Житомирський агротехнічний фаховий коледж, 2023. С. 161-162.

2. Мельник О.П., Добранський С.С. Особливості умов роботи шнеків та фактори, які визначають їх зносостійкість. *Матеріали Міжнародна науково-практичної конференція «продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклику для України та світу»*. МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 25 травня 2023 р. С. 197-200.

3. Мельник О.П. Конструктивні та експлуатаційні способи підвищення терміну служби робочих поверхонь шнеків.. *Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки"* (17–19 жовтня 2023 року). МОН України. Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2023.С. 325-328.

4. Бойко А.І., Куликівський В.Л. Дослідження контактної взаємодії зерна в засорі «витоккожук» шнекових живильників зерноочисних машин. *Науковий вісник НУБіПУ*. Київ : Ред-вид. Відділ НУБіПУ, 2011. Вип.166: Техніка та енергетика АПК. Ч.1. С.267-274.

5. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. … д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380Delcour J.A., Hoseney R.C. Principles of cereal science and technology. 3rd edition. AACC Internatioanal, Inc. 2010. 232 p.

6. Гевко Р.Б. Залуцький С.З. Розробка конструкції шнека з еластичною гвинтовою поверхнею та результати її експериментальних досліджень. *Вісник інженерної академії України*. Київ : 2015. № 1. С.242-247.

7. Гудь В.З. Механікотехнологічні основи розробки багатофункціональних секційних шнеків для зернового матеріалу: дис. … докт. техн. наук: 05.05.11. Тернопіль, 2021. 410 с.

8. Fruchtbaum J. Bulk Materials Handling Handbook. Springer Science + Business Media, 1988. 500 p. ISBN 978-1-4757-4695-2.

9. Kraus K. Installation Manual. Basic Field Practices: For Installation of Elevator and Escalator Equipment. New York Elevator Manufacturing Industry. Inc. – 1970. 532 p.

10. McCuire P. Conveyors: Application, Selection, and Integration, CRC Press, 2009. 210 p.

11. Mills D., Jones M.G., Agarwal V.K. Handbook of Pneumatic Conveying Engineering. Marcel Dekker, Inc., 2004. 701 p.

12. Primo Jurandir. Belt Conveyors for Bulk Materials Practical Calculations (Metric and US Sestems) PDHonline.org, 2009. 47 p.

13. Rulmeca. Rollers and components for bulk handling. September 2010. 310 p.

14. Swiderman R.T. et al. Foundations Swiderman R.T., Goldbeck L.J., Marti A.D., Marshall D., Strebel M.G. Fourth Edition. Martin Engineering Company, Neponset, Illinois, U.S.A., 2009. 575 p.

15. Swiderman R.T., Goldbeck P.E., Marti A.D. Foundations Martin Engineering, Neponset, Illinois, U.S.A. 223 c.