



ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ
ТА ЕНЕРГЕТИКИ



КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

КВАЛІФІКАЦІЙНА ДИПЛОМНА РОБОТА

на тему:

«Удосконалення технології відновлення деталей контактним наварюванням композиційних матеріалів з антифрикційними присадками у ТОВ «Калита-Нова» м. Кропивницький»

Виконав:

магістрант групи ТС23М-1 Богдан КОВАЛЬОВ
(шифр групи) (підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник:

К.Т.Н., доцент Іван ВАСИЛЕНКО
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри:

К.Т.Н., доцент Сергій МАГОПЕЦЬ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2024 р.

Рецензент:

К.Т.Н., професор Олексій Васильковський
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2024 р.

Кропивницький – 2024 р.

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

Рівень вищої освіти: другий (магістерський) рівень вищої освіти

Галузь знань: 20 «Аграрні науки та продовольство»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

Освітньо-професійна програма: «Технічний сервіс
сільськогосподарської техніки»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри «Експлуатація та
ремонт машин»

_____ Сергій МАГОПЕЦЬ
«__» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ**

Ковальова Богдана Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи «Удосконалення технології відновлення деталей контактним наварюванням композиційних матеріалів з антифрикційними присадками у ТОВ «Калита-Нова» м. Кропивницький»

керівник роботи Василенко Іван Федорович, К.Т.Н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові) (науковий ступінь) (вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 27.09.2024 року №65-13

2. Строк подання здобувачем роботи «20» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали дослідницької практики.

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

4.1 Розділ 1. Аналіз виробничої діяльності підприємства. Актуальність відновлення деталей сільськогосподарських машин контактним наварюванням композиційних матеріалів з антифрикційними присадками. Аналіз існуючих досліджень за темою роботи. Висновки по розділу 1.

4.2 Розділ 2. Теоретичний аналіз контактного наварювання порошковополімерних стрічок з антифрикційними присадками. Висновки по розділу 2.

4.3 Розділ 3. Аналіз впливу складу порошковополімерної стрічки на її технологічні властивості. Дослідження композиційних матеріалів з антифрикційними присадками. Висновки по розділу 3.

4.4 Розділ 4. Розробка технологічного процесу та визначення економічної ефективності контактного наварювання порошковополімерної стрічки на опорні шийки розподільного вала двигуна Д-240. Висновки по розділу 4.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: Тема, мета, об'єкт, предмет і завдання дослідження. Схема контактного наварювання різних присадних матеріалів. Схема та вигляд установки для виготовлення порошково-полімерної стрічки. Розривна машина для випробовування зразків на розтяг. Графіки технологічних властивостей порошково-полімерних стрічок різного складу. Схема установка для випробовування зносостійкості наплавлених покриттів. Результати вимірювання зносостійкості покриттів різного складу. Схема техпроцесу та показники економічної ефективності контактного наварювання порошковополімерної стрічки на опорні шийки розподільного вала двигуна Д-240.

ГРАФІК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Обґрунтування напряму наукових досліджень	04.11.2024	
2	Розділ 2. Аналіз об'єкту досліджень	11.11.2024	
3	Розділ 3. Дослідження складу порошково-полімерної стрічки та її властивостей, а також одержаних контактним наварюванням покриттів	28.11.2024	
4	Розділ 4. Обґрунтування ефективності відновлення деталей контактним наварюванням порошковополімерної стрічки	02.12.2024	
5	Оформлення ілюстративного матеріалу	02.12.2024	

Дипломник _____
(підпис)

Ковальов Б.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Іван ВАСИЛЕНКО
(ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна магістерська робота присвячена відновленню деталей сільськогосподарських машин контактним наварюванням композиційних матеріалів з антифрикційними присадками.

Метою представленої роботи є розробка нових композиційних присадних матеріалів з поліпшеними триботехнічними властивостями, що застосовуються для відновлення зношених деталей контактним наварюванням.

Об'єктом дослідження є процес виготовлення та контактного наварювання композиційних матеріалів з антифрикційними присадками.

Предмет дослідження – властивості порошковополімерних стрічок та антифрикційних покриттів, одержаних контактним наварюванням.

Для досягнення мети в роботі визначені такі завдання:

1. Вивчити перспективи застосування композиційних матеріалів з АФП для відновлення зношених поверхонь.
2. Дослідити нові полімерні сполучні матеріали для порошковополімерних стрічок, що підвищують її технологічні властивості.
3. Розробити нові види порошковополімерних стрічок з антифрикційними присадками. Провести теоретичні дослідження раціональних режимів формування порошковополімерних стрічок.
4. Дослідити вплив складу порошковополімерних стрічок та режиму контактного наварювання на структуру та механічні властивості композиційних покриттів.
5. Розробити технологію контактного наварювання порошковополімерних стрічок та оцінити економічну ефективність розробленого технологічного процесу.

На підставі аналізу літературних джерел зроблено висновок, що застосування як присадного матеріалу при відновленні зношених деталей контактним наварюванням порошковополімерних стрічок дозволить спростити процес наварювання та наносити широкий спектр порошкових матеріалів, а

застосування антифрикційних присадок створить умови для зменшення коефіцієнту тертя і підвищення опірності захопленню тертьових поверхонь.

На підставі теоретичного аналізу встановлено, що використання антифрикційних присадок у композиційних порошкових матеріалах дає змогу зменшити коефіцієнт тертя, збільшити опір захопленню та підвищити зносостійкість сполучення. Встановлено, що швидкість обертання вальців при виготовленні порошковополімерних стрічок залежить тільки від теплофізичних характеристик компонентів стрічки.

Експериментальні дослідження показали, що процес отримання порошковополімерних стрічок прокаткою через нагріті вальці є найбільш технологічним і продуктивним способом. Розроблений спосіб армування порошковополімерних стрічок сталевую сіткою дозволяє спростити процес її контактного наварювання на поверхні деталей обертання.

Композиційні покриття з присадками або олова, або міді мають знос за час випробувань більш ніж у 2 рази менший, ніж знос покриттів без присадок. Наявність антифрикційних покриттів зменшує також коефіцієнт тертя в сполученні приблизно в 1,5 разу.

Розраховано економічний ефект при використанні розробленого технологічного процесу відновлення розподільних валів двигуна Д-240 контактним наварюванням порошковополімерних стрічок.

Кваліфікаційна магістерська робота складається з вступу, 4 розділів, висновків; містить 66 сторінок тексту, 16 рисунків, 6 таблиць.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	
ВСТУП	
РОЗДІЛ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
1.1 Коротка історія та характеристика ТОВ “Калита-Нова” м. Кропивницький	
1.2 Підвищення ресурсу сполучення деталей сільськогосподарської техніки, що працюють в умовах тертя ковзання	
1.3 Аналіз способів відновлення автотракторних деталей	
1.4 Обґрунтування застосування порошково-полімерних стрічок як присадного матеріалу при відновленні зношених деталей електроконтактним наварюванням	
1.5 Способи підвищення антифрикційних властивостей композиційного покриття	
1.6 Висновки, мета та основні завдання досліджень	
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОБ’ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ	
2.1 Обґрунтування вибору складу для композиційного матеріалу з антифрикційними присадками	
2.2 Розрахунок оптимальної кількості сполучного полімеру в композиційному матеріалі (ППС)	
2.3 Розрахунок раціональних режимів прокатки порошково-полімерної стрічки	
2.4 Дослідження зміни стану полімерної частинки під час електроконтактного приварювання	
2.5 Висновки	
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ПОРОШКОВОПОЛІМЕРНОЇ СТРІЧКИ ТА ЇЇ ВЛАСТИВОСТЕЙ, А ТАКОЖ ОДЕРЖАНИХ КОНТАКТНИМ НАВАРЮВАННЯМ ПОКРИТТІВ	
3.1 Вплив складу порошковополімерної стрічки на її технологічні властивості та міцність зчеплення з основним металом	
3.1.1 Спосіб отримання порошково-полімерної стрічки	
3.1.2 Дослідження технологічних властивостей порошково-полімерних стрічок та експериментальне визначення оптимальної кількості сполучного полімеру	
3.1.3 Визначення режимів контактного наварювання ППС	
3.2 Дослідження властивостей композиційного покриття з антифрикційними присадками	
3.2.1 Вплив антифрикційних присадок на триботехнічні характеристики композиційного покриття і сполучення в цілому	
3.3 Висновки	

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ КОНТАКТНИМ НАВАРЮВАННЯМ ПОРОШКОВОПОЛІМЕРНОЇ СТРІЧКИ	
4.1 Технологічний процес та аналіз ефективності відновлення розподільного вала двигуна Д-240 контактним наварюванням порошковополімерної стрічки	
4.2 Висновки	
ВИСНОВКИ	
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КН – контактне наварювання;

ППС – порошковополімерна стрічка;

КП – композиційне покриття;

АФП – антифрикційні присадки;

ПВБ – полівінілбутираль;

ПВХ – полівінілхлорид;

ДОФ – діоктилфталат.

ВСТУП

В умовах війни, коли сільськогосподарські підприємства мають обмежені можливості для придбання нової техніки, ремонт наявних машин є важливим резервом збереження технічного потенціалу АПК. Особливого значення набувають ресурсозберігаючі технології, що реалізуються без істотного збільшення матеріальних витрат. Цим умовам багато в чому відповідає метод контактного наварювання (КН). Цей спосіб відомий порівняно давно, і він залишається одним із перспективних способів відновлення деталей машин, оскільки має ряд переваг перед іншими способами: відсутність нагрівання деталі, можливість приварювання шару сталевий стрічки, дроту та металевих порошків заданої товщини, зменшення витрат металу (у порівнянні з наплавленням) у 2-4 рази, відсутність вигорання легуючих елементів й ін. Маючи цілий ряд позитивних властивостей, спосіб КН не знайшов широкого застосування. Разом з тим шляхи розширення технологічних можливостей даного способу далеко не вичерпані.

Основним способом підвищення зносостійкості відновлених деталей в даний час є підвищення твердості покриття. Підвищення твердості покриттів, що наносяться, в першу чергу виправдане для робочих органів сільськогосподарських машин і для деталей, що працюють в абразивному середовищі, але не завжди виправдане для деталей машин, наприклад деталей двигуна внутрішнього згорання, що мають крім абразивного зносу, втомний, корозійно-механічний, знос при захопленні, фретинг-корозію та інші види зносу. Зі збільшенням твердості відновлюваних деталей, автоматично підвищуються вимоги до якості поверхні, а саме до її шорсткості, оскільки дрібні виступи на твердій поверхні діють як абразивні частинки, особливо при сухому терті та граничному мастилі. Тому при виборі матеріалу присадок необхідно оцінювати вплив покриття на сполучену деталь.

Відомі правила вибору матеріалів пар тертя і рекомендації по співвідношенню твердості матеріалів деяких видів сполучення. Бажано, щоб

матеріали пар тертя забезпечували утворення тонких м'яких плівок у процесі контактування поверхонь, внаслідок ефекту схоплювання з м'якою структурною складовою, і як результат – зменшення сили тертя та забезпечення роботи сполучення без задирок. Ці м'які структурні складові утворюються в результаті введення в металопокриття антифрикційних присадок (АФП).

Застосування антифрикційних присадок в композиційних покриттях на сьогоднішній день є новим напрямом при відновленні зношених деталей машин, а за наявності великої різноманітності порошкових матеріалів, відкриваються можливості створення найрізноманітніших композиційних покриттів, порівняно з присадними матеріалами, що випускаються, що мають обмежену номенклатуру. Головною перевагою металопорошкових композицій є можливість спрямованого формування необхідної структури присадного матеріалу, що дозволяє зробити керованим процес отримання заданих фізико-механічних властивостей покриття, що наноситься.

Об'єктом дослідження є процес виготовлення та контактного наварювання композиційних матеріалів з антифрикційними присадками.

Предмет дослідження – властивості порошковополімерних стрічок та антифрикційних покриттів, одержаних контактним наварюванням.

РОЗДІЛ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Коротка історія та характеристика ТОВ “Калита-Нова”

м. Кропивницький

Підприємство “Калита-Нова” зареєстроване 12 липня 2018 року в формі товариства з обмеженою відповідальністю. Початковою спеціалізацією роботи підприємства було відновлення колінчастих валів методом електродугового напилення.

2019 році підприємство зробило значний крок у напрямку підвищення якості та ефективності ремонту двигунів внутрішнього згорання. Була введена в експлуатацію сучасна лінія відновлення блоків циліндрів, оснащена високоточним розточувальним обладнанням. Застосування інноваційної технології хонінгування з використанням алмазних інструментів дозволило досягти значного збільшення ресурсу відновлених деталей.

У 2020 році спектр послуг підприємства розширився. Відкриття ділянок з ремонту головок блоків циліндрів та паливної апаратури дозволило надавати клієнтам комплексні рішення з відновлення двигунів. Впровадження універсального координатно-розточувального верстата особливої точності відкрило нові можливості для відновлення різноманітних деталей, що раніше вимагали заміни.

2021 рік ознаменувався подальшою модернізацією виробництва. Була впроваджена передова технологія фірми “NEWAY” для ремонту головок блоків циліндрів, що дозволило підвищити якість та надійність виконаних робіт. Крім того, було відкрито ділянки зварювально-рихтувальних робіт, шиномонтажу та балансування коліс, а також розпочато роботи по ремонту ходових частин легкових автомобілів. Це дозволило підприємству стати універсальним сервісом для автомобілістів, надаючи повний комплекс послуг з ремонту та обслуговування автомобілів.

Зараз основними видами діяльності підприємства є:

- ремонт і технічне обслуговування машин і обладнання сільськогосподарського та промислового призначення;
- оптова торгівля деталями для автотранспортних засобів;
- роздрібна торгівля деталями для автотранспортних засобів;
- технічне обслуговування і ремонт автотранспортних засобів.

На даний час на підприємстві постійно проводяться маркетингові дослідження можливості надання послуг по ремонту та діагностуванню різних вузлів та систем двигунів та автомобілів: ведуться роботи по впровадженню дільниці діагностики двигунів, дільниці відновлення гальмівних барабанів та ремонту паливної апаратури дизельних двигунів.

1.2 Підвищення ресурсу сполучення деталей сільськогосподарської техніки, що працюють в умовах тертя ковзання

Переважна більшість деталей машин виходять з ладу через зношування. Зношування деталей є закономірним процесом, що призводить до зміни розмірів, форми та стану робочих поверхонь. Принципово важливим є поділ всіх видів руйнування робочих поверхонь деталей при терті на нормальні, теоретично неминучі і практично допустимі процеси зношування, і патологічні явища ушкодження, не допустимі при роботі машин. До допустимих видів руйнування поверхонь тертя відноситься велика група явищ, пов'язана з деформацією, текстурованням поверхневих об'ємів металу, їх подальшою взаємодією з хімічно активними компонентами робочого середовища і руйнуванням утворених структур (механо-хімічний знос). Водночас зношені деталі, які мають високу вартість, економічно доцільно відновлювати.

У даний час існує безліч різних способів відновлення зношених деталей і застосовується багато різних присадних матеріалів, але одним з найважливіших напрямів розробки нових присадних матеріалів для відновлення деталей є дослідження композиційних матеріалів.

Як присадні матеріали можуть застосовуватися композиції, що складаються з металевих (порошки заліза, міді, свинцю, легованих сплавів та ін) і неметалічних матеріалів (порошки нітридів, боридів, карбідів, оксидів металів, полімери). [1, 2, 18]. Наявність такого різноманіття створює передумови для управління зносостійкістю деталей шляхом направленою формування необхідної структури металопокриття. При цьому слід враховувати можливість створення КП без застосування складного та дорогого обладнання, що досягається простим змішуванням порошкових компонентів та нанесенням їх на поверхню деталі контактним наварюванням, оплавленням на поверхні або іншим способом.

Досліджуючи новий присадний матеріал для відновлення деталей машин, необхідно в першу чергу розглядати його зносостійкість у парі з іншою деталлю, оскільки зносостійкість сполучення визначає довговічність вузла тертя. Велика різноманітність конструкцій вузлів і умов тертя, можливість застосування різних присадних матеріалів або неприпустимість їх використання вимагає в кожному окремому випадку проведення спеціальних досліджень з вибору матеріалів пар тертя. При цьому часто варіюють обидва елементи (матеріали) пари тертя, а в ряді випадків – вид мастила. Тут з'являється велика свобода вибору, але важко знайти оптимальний варіант. Застосування тих чи інших матеріалів диктується передусім умовами роботи сполучення: швидкістю, температурою, питомими навантаженнями, середовищем, наявністю мастила тощо. При збільшенні зносостійкості відновленої деталі в 2-5 разів у порівнянні з новою і без урахування зносостійкості спряженої деталі, може виявитися, що ресурс сполучення виявиться малим внаслідок сильного зносу спряженої деталі. Необхідно, щоб пара тертя була сумісна, тобто щоб матеріали, що контактують, пристосовувалися один до одного і до умов тертя, забезпечуючи задану довговічність. У разі короткочасних аварійних режимів, наприклад, припинення подачі мастила, матеріали повинні реагувати на це, створюючи на поверхні захисні структури, що запобігають надмірному зносу і руйнування

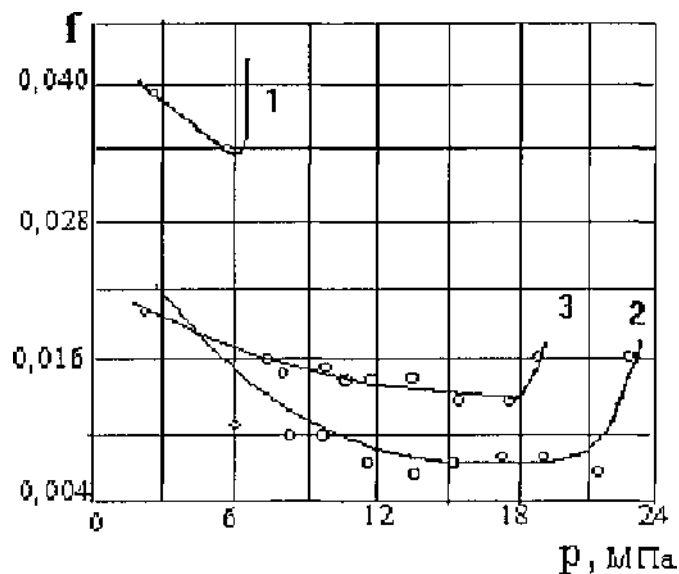
контактуючих поверхонь, при яких подальша робота вузла стає неможливою. Таким чином, для створення працездатного вузла потрібна умова сумісності поверхонь, що труться.

Більшість автотракторних деталей працюють з шаром мастильного матеріалу, тобто реалізується граничне або рідинне тертя при встановленому режимі роботи. Тому захист від корозії забезпечується присутністю мастила. Отже, автотракторні деталі типу “вал-втулка”, що труться, піддаються в основному абразивному, втомному і адгезійному зношуванню [2, 8, 15, 19].

Відповідно до ДСТУ 2823-94, «абразивне зношування – механічне зношування внаслідок дії твердих тіл або твердих частинок, які ріжуть чи дряпають поверхню матеріалу. Утомне зношування – механічне зношування внаслідок руйнування від втоми в умовах багаторазового деформування мікрооб’ємів матеріалу поверхневого шару. Циклічно змінні контактні напруження, що виникають у парах тертя викликають поверхневе втомне руйнування у вигляді утомних тріщин, викришування і відшаровування матеріалу. Адгезійне зношування (зношування при заїданні) – зношування внаслідок локального адгезійного з’єднання двох твердих тертьових тіл та глибокого виривання матеріалу з їхніх поверхневих шарів» [5].

Здатність металів при граничному терті працювати без схоплювання дуже важлива для деталей машин, оскільки схоплювання є основною причиною утворення задирок і заїдання і викликає один з найінтенсивніших і руйнівних видів зношування.

На роботу змащуваних пар, що труться, впливають також і розміри абразивних частинок. Так, домішки органічного походження, зокрема частинки пилу розміром до 3 мкм, збільшують антифрикційні властивості масел, які зміцнюють граничні адсорбовані плівки. Це видно з рис. 1.1 [17].



1, 2 – у мастилі з абразивом до 5 мкм і 3 мкм відповідно; 3 – у мастилі без абразиву

Рисунок 1.1 – Залежність коефіцієнту тертя від питомого тиску

Враховуючи, що в автотракторних двигунах фільтруючі елементи тонкого очищення масла і центрифуги повинні затримувати абразивні частинки розмірами більше 2 і 1 мкм відповідно [2, 18], можна сказати, що абразивний знос, наприклад, у парі підшипник ковзання – шийка колінчастого валу відсутній. Проте, на практиці цього часто не відбувається через незадовільне технічне обслуговування і несвоєчасну заміну моторного масла, внаслідок чого в автотракторних двигунах має місце і абразивний знос.

Для боротьби з різними видами зносу доцільне використання гетерогенної структури [2]. Доведено [2, 18], що структурно неоднорідний матеріал зношується як одне ціле, тому в процесі тертя відбувається перерозподіл питомого навантаження: воно збільшується для більш зносостійких включень і зменшується менш зносостійких. Гетерогенні матеріали менш схильні до захоплення, ніж гомогенні. Для деталей, що працюють при високих контактних тисках, тверді включення обмежують область мікросхоплення таких матеріалів і перешкоджають протіканню процесу макросхоплення [17].

Аналізуючи автотракторні сполучення пар тертя [5, 6], неважко помітити, що більшість пар тертя складаються з міцного твердого валу і м'якої зносостійкої втулки. Зносостійкість у цих з'єднаннях досягається за рахунок таких процесів [17]:

1. Утворення тонких м'яких плівок у процесі контактування поверхонь, внаслідок ефекту схоплювання з м'якої структурної складової матеріалу та зменшення, в результаті цього, сили тертя.

2. Зменшення тертя на окремих ділянках металевого контакту, внаслідок швидкого зменшення контактної напруги, за наявності м'яких поверхневих шарів.

3. Утворення плівки м'яких металів, у разі гетерогенної будови сплаву з наявністю м'якої фази. Плівка утворюється внаслідок більшої здатності м'якої фази пластично деформуватися при менших навантаженнях, ніж міцніша матриця сплаву, і видавлюватися за рахунок відмінності в коефіцієнтах лінійного розширення.

З урахуванням вищесказаного, висувається припущення про можливість підвищення зносостійкості автотракторних деталей, що відновлюються, шляхом КН композиційних матеріалів, що складаються із залізного порошку та порошкових антифрикційних матеріалів (мідь, свинець, латунь, олово, деякі полімери та ін.). При цьому можуть утворюватись сполучення: "КП – м'яка втулка" або "КП – тверда втулка (вал)".

Поряд з цим необхідно відзначити, що в роботах , присвячених підвищенню довговічності деталей [1-3, 18-19], велика увага приділена покриттям, що складаються з пружно-пластичної матриці та твердих включень (порошків карбідів, боридів тощо), зносостійкість яких у 2-10 разів вище зносостійкості нової деталі. Використання таких покриттів у парі з м'яким матеріалом підвищує вимоги до якості поверхні, а саме до її шорсткості, оскільки найдрібніші виступи на твердій поверхні діють як абразивні частинки. Досліджень з вивчення методів відновлення деталей шляхом КН композиційних матеріалів з АФП не проводилося, а більшість досліджень у

галузі відновлення деталей КН порошкових матеріалів було спрямовано на вивчення зносостійкості покриттів з твердими включеннями.

1.3 Аналіз способів відновлення автотракторних деталей

У сучасних умовах, при прагненні до зниження собівартості продукції машинобудування та підвищення її якості, ведеться пошук нових матеріалів та технічних рішень для виконання цього завдання. Розвиток машинобудування впливає і на способи ремонту техніки, до якої нині висуваються високі вимоги.

Використання нових запасних частин при ремонті машин, замість використання відновлених деталей призводить до зниження економічної ефективності ремонту. Для більш широкого застосування відновлених деталей необхідно, щоб методи відновлення відповідали таким вимогам [17-19].

1. За фізико-механічними та експлуатаційними властивостями:

- відсутність глибокого термічного впливу на основний матеріал деталі, що дозволяє не допускати великих структурних змін, деформацій і короблення деталі;
- збереження, по можливості, втомної міцності деталі;
- забезпечення високої зносостійкості сполучення;
- забезпечення надійної міцності зчеплення покриття з основним металом.

2. За технологічними можливостями:

- відновлення деталей різних розмірів;
- нанесення покриття різної товщини та забезпечення мінімального припуску на механічну обробку;
- застосування порошкових та компактних присадних матеріалів;
- забезпечення мінімальної кількості основних та допоміжних операцій;
- забезпечення автоматизації процесу.

3. За економічними критеріями:

– вартість відновленої деталі повинна бути значно нижчою за вартість нової деталі;

– забезпечення високого коефіцієнта використання присадного матеріалу;

– забезпечення високої продуктивності процесу відновлення деталі.

4. Забезпечення високої екологічної чистоти та сприятливих умов роботи.

Оптимальним є такий спосіб відновлення зношеної деталі, який дозволяє усунути її дефекти при найменших матеріально-трудових витратах і відновити її працездатність до рівня нової деталі.

Аналізуючи сучасні способи відновлення з урахуванням вимог, що висуваються до них, а також з урахуванням того, що близько 85% відновлюваних деталей тракторів, автомобілів і складних сільськогосподарських машин вибраковуються при зносах 0,1...0,3 мм [11-13], можна виділити як найефективніший, спосіб відновлення деталей контактне наварювання (КН). Серед інших переваг при КН відсутнє вигорання легуючих елементів присадного матеріалу і перемішування його з основним металом, що полегшує отримання необхідних властивостей покриття, порівняно з дуговим наплавленням. У роботі [13, 17] наведені деякі дані щодо вигорання легуючих елементів при КН та наплавленні (табл. 1). Як видно з результатів хімічного аналізу, вигорання вуглецю та легуючих елементів при КН незначне. Незначне вигорання легуючих елементів при КН відбувається через деякі особливості цього процесу. До них можна віднести відсутність рідкої ванни, короткочасний вплив високої температури (до 0,1 с) і швидке охолодження місця контакту (приварювання), утрудненість потрапляння кисню в зону приварювання. Якщо розглядати процеси, що відбуваються у шарі порошку при КН порошкових матеріалів, їх можна розділити на дві стадії: 1) зчеплення або спікання частинок; 2) зміна форми частинок, що полегшує їх подальше зчеплення

Таблиця 1.1 – Вигорання легуючих елементів при різних способах нанесення зносостійких покриттів [13, 17]

Елементи хімічного складу	Вихідний порошок	КН, %	Наплавлення, %
C	5.5	5.49	5.45
Cr	43	42.7	38.3
B	0.9	0.85	0.81

Реакції під час спікання можна розглядати з термодинамічної точки зору. Перетворення спресованого тіла на спечений продукт пов'язане зі зменшенням вільної енергії системи. З процесів та явищ, які накладаються на перебіг спікання, за всіх умов мають значення реальні структури частинок порошків, а також величина, форма та розподіл цих частинок. Найбільше значення при спіканні має висока питома поверхня порошків. Енергія, необхідна для утворення цієї поверхні, при спіканні звільняється і становить основну частку рушійної сили процесу, хоча за абсолютною величиною ця енергія відносно мала [9, 10]. Але, при цьому не слід нехтувати явищами підвищеної активності, пов'язаними з дефектами кристалічної будови, як-от: вакансії, спотворення та напружений стан решіток механічного або хімічного походження.

Спікання супроводжується поверхневою та об'ємною дифузією. Рушійними силами процесу спікання є, як правило, градієнти температури, тиску та концентрації. Великі швидкості нагрівання [2, 18] сприяють прискоренню дифузійних процесів.

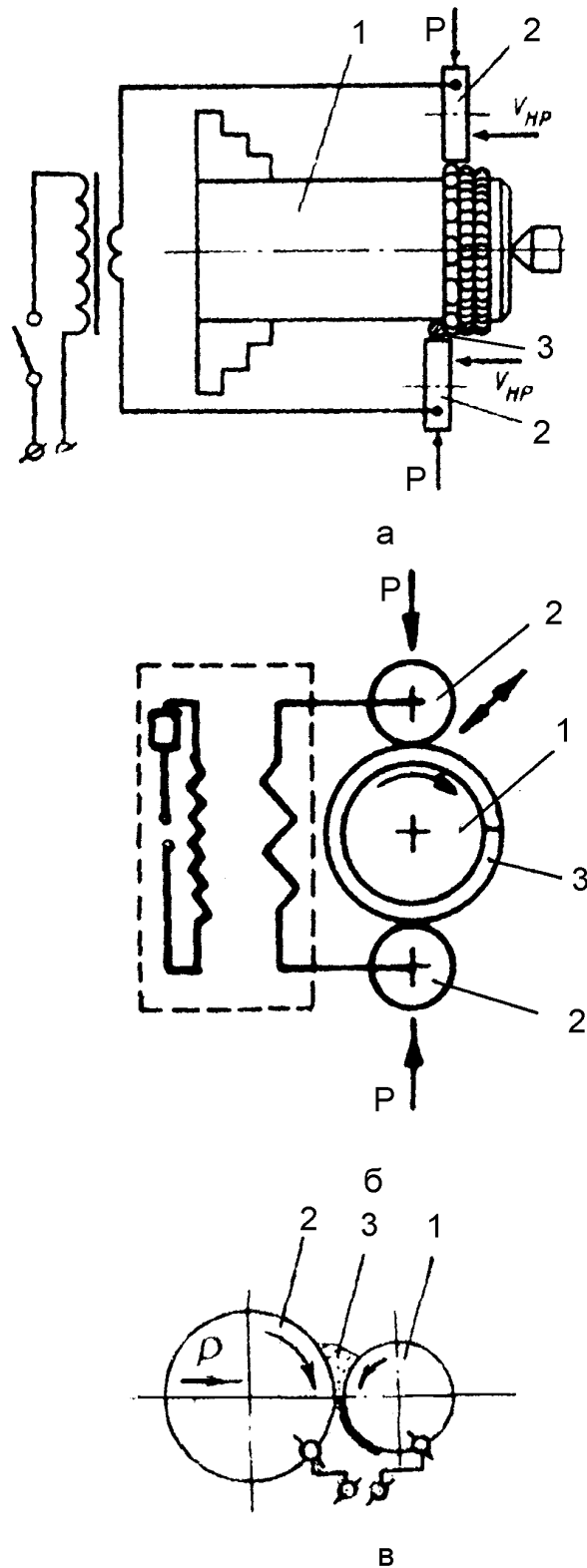
У ході спікання порошкова система ущільнюється, в ній розсмоктуються поля напружень і надмірна вільна поверхнева енергія, а також зменшується енергія, пов'язана зі спотвореннями решітки. Встановлено, що усадка порошків у процесі спікання залежить не тільки від температури спікання та розміру частинок, але й від здатності цих матеріалів до пластичної деформації.

1.4 Обґрунтування застосування порошково-полімерних стрічок як присадного матеріалу при відновленні зношених деталей електроконтактним наварюванням

Для нанесення порошкових матеріалів на поверхню деталей може застосовуватися плазмове та детонаційне напилення, газова, електродугова та високочастотна металізація. Основною перешкодою, що стримує застосування вищезазначених способів при нанесенні порошкових матеріалів, є деструкція та нерівномірність розподілу компонентів шихти. Також існують інші способи отримання порошкових покриттів: оплавлення заздалегідь нанесеного на деталь металевого порошку в печі, в індукторі, нагріванням лазерним променем [2, 17, 18], які також не позбавлені вищезазначених недоліків. Ці недоліки, як відомо, успішно усуваються при використанні методів порошкової металургії, що полягають у спільній дії тиску і температури протягом деякого часу на сформовану заздалегідь порошкову шихту [2, 18]. Із сучасних способів нанесення покриттів найбільш близькою за технологічними параметрами до зазначених методів порошкової металургії є контактне наварювання (КН), яке є ефективним способом нанесення покриттів з різних присадних матеріалів (сталеві стрічки, дроту, порошоків).

Способом КН можна наносити на зношену поверхню заздалегідь спечені композиційні порошкові матеріали рис. 1.2 [18]. Однак застосування спечених порошкових стрічок, у яких містяться залізні порошки типу ПЖ, викликає певні труднощі при відновленні деталей типу “вал” через крихкість стрічки. Разом з тим недоліком прокатоного і спеченого порошкового матеріалу є зменшення активності порошкової системи в результаті зниження її надлишкової енергії в період контактного наварювання, оскільки первинне спікання вже відбулося в процесі виготовлення стрічки [17, 18].

Порошкові матеріали також можна наносити КН. Метод вільної подачі порошку (самопливом) практично не дозволяє керувати товщиною привареного шару, виключає зовнішнє охолодження роликів і деталі, вимагає додаткових



1 – наварювана деталь; 2 – ролик-електор; 3 – присадний матеріал

Рисунок 1.2 – Схеми контактного наварювання дроту (а), стрічки (б) та порошку (в) на деталі типу “вал”

пристроїв для виключення нерівномірної товщини шару порошку при приварюванні та його висипання. Крім того, застосування феромагнітних порошоків утруднюється при подачі їх самопливом, оскільки використання імпульсного струму призводить до зникнення магнітного поля під час паузи, при якій порошок обсипається з деталі, що погіршує якість формування шару [17]. Тому вважаємо за доцільне використовувати додаткові компоненти, що виконують тільки допоміжну роль зв'язки для інших функціональних компонентів покриття, при цьому сполучні компоненти частково або повністю вигоряють при КН.

Нині існують такі способи попереднього формування порошкового матеріалу і подальшого КН.

1. На поверхню деталі наносять тонку плівку клейкої речовини, а потім шар композиційних матеріалів. Шар обкатують роликami-електродами і приварюють електроконтактним способом. Перевагою способу є можливість регулювання товщини шару, що приварюється, використання частинок (гранул) різної форми і розмірів. До недоліків належить висока трудомісткість формування шару на поверхні деталі [8].

2. На металеву стрічку наносять тонку плівку клейкої речовини, а потім шар порошкового або гранульованого матеріалу. Після цього стрічку приварюють до поверхні виробу, розташовуючи порошковий шар між стрічкою і поверхнею деталі. До переваг цього способу, порівняно з першим, належить зниження трудомісткості та підвищення продуктивності праці. Недоліком способу є підвищені вимоги до форми, розмірів і фізико-механічних властивостей гранул під час використання армувальних матеріалів (гранул спечених твердих сплавів), одношарове розташування армувального матеріалу під час приварювання за один прохід [8].

3. КН порошкових матеріалів в оболонках (порошковий дріт, поліетиленові мішечки тощо). Перевагою цього способу є зниження трудомісткості та підвищення продуктивності праці, можливість автоматизації процесів виготовлення і приварювання зазначених матеріалів. Недоліком

способу є можлива сепарація частинок композиційного матеріалу в оболонках у процесі зберігання і транспортування, нерівномірність структури покриття в зоні стиків витків і торкання сусідніх оболонок [1-3].

4. Формування порошкових матеріалів в еластичну стрічку, використовуючи як сполучний матеріал різні полімери [4, 17]. Частинки металевого порошку можуть утримуватись тонкими оболонками або частинками струмонепроникного полімерного матеріалу, що дає змогу сформувати заздалегідь задану макроструктуру присадного матеріалу, яка зберігається після наварювання. Використання таких стрічок дає змогу регулювати в певних межах товщину покриття з мінімальним припуском на механічну обробку; використовувати найрізноманітніші порошки (зокрема, карбіди, нітриди й бори́ди тугоплавких металів, неелектропровідні керамічні матеріали) та їхні суміші; застосовувати охолоджувальну рідину в процесі приварювання, забезпечуючи мінімальне нагрівання деталі; забезпечити високу продуктивність, можливість варіювання в широких діапазонах технологічних режимів КН, забезпечуючи тим самим різні структури покриття, отримані в режимах спікання, плавлення, наявності рідкої фази, а також автоматизувати як процес виготовлення, так і процес приварювання у відповідності з вимогами до сучасних технологій тощо. До недоліків способу належать необхідність відсмоктування продуктів згоряння полімерного сполучного матеріалу, обмеження товщини шару (до 1,2 мм), отриманого за один прохід.

Аналіз переваг і недоліків перерахованих способів дає змогу дійти висновку про найперспективніший спосіб формування порошкових матеріалів у вигляді еластичних стрічок із полімерним сполученням. Водночас процес утворення таких стрічок маловивчений, у технічній літературі відсутнє будь-яке теоретичне обґрунтування цього процесу, обмежені марки використовуваних полімерів.

1.5 Способи підвищення антифрикційних властивостей композиційного покриття

Способи підвищення антифрикційних властивостей КП безпосередньо залежать від умов роботи сполучення (тиску, температури, швидкості відносного переміщення сполучених деталей) і виду тертя (рідинне, граничне, тертя без змащення). Виходячи з конкретних умов роботи, вибирають компоненти КП і метод його нанесення. Водночас є загальні властивості, які повинні мати антифрикційні композиційні покриття: це добре припрацьовування, зносостійкість, низький коефіцієнт тертя в парі з матеріалом контр-тіла, мала схильність до заїдання (схоплення), здатність забезпечувати рівномірне змащування поверхонь тертя.

Усі пари тертя, як правило, повинні мати антифрикційність, під якою в загальному випадку слід розуміти комплекс властивостей, яким має відповідати поєднання трьох тіл – матеріалів деталей пари тертя та застосовуваної мастильної речовини. Мастильна речовина є таким самим конструктивним фактором, як і матеріал деталі. Додатково зауважимо, що зносостійкість є вимогою до всіх матеріалів, у тому числі фрикційних, за винятком покриттів для припрацювання.

У чистому вигляді метали, як правило, не мають комплексу антифрикційних властивостей, тому при створенні антифрикційних матеріалів методами порошкової металургії за основу береться якийсь з недорогих і доступних металів (переважно залізо, мідь, алюміній). Необхідні антифрикційні властивості надаються основі додатковим введенням антифрикційних присадок (АФП).

Літературні дані щодо застосування присадних матеріалів з АФП при відновленні деталей КН відсутні, тому для аналізу фізико-механічних та експлуатаційних властивостей подібних покриттів, доцільно використовувати широкі дані щодо спечених композиційних матеріалів, отриманих методами порошкової металургії. У цій аналогії, звичайно, є й недоліки, оскільки спечені

матеріали здебільшого витримуються відносно тривалий час при високих температурах для протікання процесів спікання і взаємної дифузії, що практично відсутня при КН в силу дуже нетривалого впливу температури (0,04...1 с).

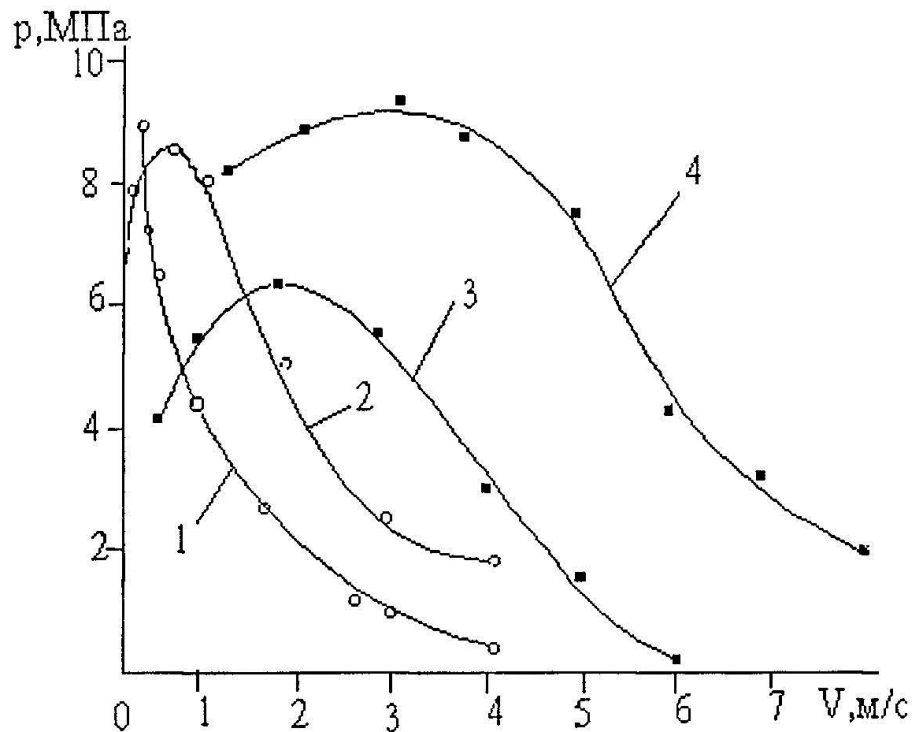
Введення м'яких металів в матеріал дозволяє добитися не тільки поліпшення умов тертя, а й деякого збільшення міцності покриття, що важливо при високих навантаженнях. Так введення в пористе залізо 2-5% міді підвищує його міцність залежно від вмісту міді в 1,5...2 рази. При цьому мікротвердість підвищується від 830...1310 до 1200...2040 МПа. Ще більше підвищення міцності досягається при одночасному легуванні заліза вуглецем та міддю. Порівняльні характеристики деяких композицій Fe-Cu-C щодо їхньої несучої здатності в залежності від швидкості ковзання показують, що легування пористого заліза міддю та графітом (рис. 1.3) дозволяє значно підвищити його граничне навантаження [8].

З урахуванням сказаного вище, аналіз властивостей спечених матеріалів, отриманих методами порошкової металургії, може допомогти в аналізі та виборі компонентів порошково-полімерної стрічки (ППС), що використовується для відновлення деталей машин КН.

Композиційний матеріал з АФП, нанесений на зношену поверхню, являє собою матеріал матрично-наповненого типу з гетерогенною структурою, що складається з ділянок зносостійкого, з низьким значенням коефіцієнта тертя антифрикційного матеріалу і металу або сплаву, здатного міцно утримувати ці включення, що сприймає основне навантаження в зоні тертя, а антифрикційний матеріал виконує роль твердого мастила, забезпечуючи самозмазування пари тертя шляхом утворення і безперервного відновлення на робочій поверхні тонкої, легко рухомої плівки.

Для опору схоплюванню у разі посилення тертя можуть застосовуватися КП, отримані контактним наварюванням порошкових матеріалів, які мають ефект самозмащування, тобто збереження шару мастила на поверхнях тертя за рахунок мастила, що знаходиться в порах, утворених при наварюванні

порошкових матеріалів. При несприятливих умовах мащення, перехідних режимах тертя виникає місцеве нагрівання, що викликає виділення мастильного матеріалу з пор покриття, цим запобігаючи схоплювання. Однак необхідно враховувати, що при високій пористості погіршуються характеристики міцності покриття.



1 – залізо з 0,3% С та 1% Cu; 2 – залізо з 0,3% С та 5% Cu, 3, 4 – пористе залізо

Рисунок 1.3 – Залежність величини навантаження від швидкості ковзання для спечених антифрикційних матеріалів на основі заліза пористістю 20 % при терті в режимі самозмащування (1,2) при краплинній подачі мастила (3), при мащенні під тиском (4)

Дані табл. 1.2 свідчать про зниження характеристик міцності та пластичності в три та більше раз при збільшенні пористості від 5 до 30% [8].

Таблиця 1.2 – Вплив пористості на міцність спеченого заліза

Пористість зразка, %	Міцність на розтяг, МПа	Відносне подовження, %	Твердість, МПа	Ударна в'язкість, Дж/м ² ·10 ⁴
5	-	-	1190	33
10	230	15,8	960	14
15	197	12,2	800	9,8
20	158	9	660	6,9
25	126	6,4	540	5,9
30	102	5	420	2,9

Зменшення міцності матеріалу обмежує допустиму верхню межу пористості, а внаслідок можливої фільтрації масла через пори, яка проявляється при пористості більше 25% настає втрата несучої здатності пористого покриття, тому для конкретних умов роботи потрібно визначати оптимальну межу пористості.

При зростанні швидкостей тертя найнижчі значення коефіцієнта тертя, зношування та температури на поверхнях тертя дають матеріали з мінімальною пористістю. Зі збільшенням пористості матеріалів, підвищується кількість мастила, що подається в зону тертя, що сприяє зростанню тривалості роботи, гранично допустимого навантаження, зниження температури в зоні тертя та часу приробітку [16].

Одна з важливих характеристик КП – коефіцієнт тертя, величина якого визначає рівень втрати енергії у вузлах тертя. На величину коефіцієнта тертя великий вплив має мастило та навколишнє газове середовище, особливо у випадках, коли зміна газового середовища пов'язана з переходом від окислювального зносу до зносу захоплюванням. Зменшення коефіцієнта тертя спостерігається при введенні в мастило поверхнево-активних речовин, які адсорбуючись на поверхнях тертя, пластифікують їх, підвищуючи рухливість

тонкого шару вторинних структур, і, тим самим зменшують коефіцієнт тертя [8, 15].

Для зменшення коефіцієнта тертя в спечений матеріал вводять так звані антизадирні присадки і тверді мастила, до яких відносяться графіт, сірка, сульфіді, деякі легкоплавкі метали та їх сплави, полімери та ін. [4, 17].

На значення коефіцієнта тертя великий вплив має також величина питомого тиску у спряженні. Коефіцієнт тертя залізографіту зі збільшенням питомого тиску від 0,4 до 2,2 МПа зменшується приблизно в три рази, а литої бронзи вдвічі [17]. Зниження коефіцієнта тертя, чи його стабільність із підвищенням навантаження свідчить про працездатність матеріалу при даних режимах тертя. Підвищення коефіцієнта тертя свідчить про зміну умов тертя, наприклад, переходу з рідинного в граничний режим або про розвиток процесів схоплювання.

На антифрикційні властивості КП також впливають режими КН. Технологічні режими КН визначають розмір і форму частинок порошку, величину їх поверхні, фізичну та хімічну активність, характер контактів між зернами та загальну міцність матеріалу, загальну пористість. Найбільший вплив на щільність КП має тиск при КН. Зі збільшенням струму при наврюванні КП спостерігається підвищення міцнісних характеристик покриття [1, 2, 18].

Ефективним засобом підвищення зносостійкості КП є додавання протизадирних добавок. Такі матеріали характеризуються добре вираженою гетерогенною структурою. Протизадирні (антисхоплювальні) добавки вводяться зазвичай у кількості 15-25% від загального об'єму.

Таким чином, для збільшення зносостійкості, опірності схоплювання та зменшення коефіцієнта тертя необхідно утворення на поверхнях тертя тонких, легко рухливих, м'яких плівок, які можуть утворюватися за рахунок таких процесів:

1. Покриття тертьових поверхонь тонкими шарами м'яких металів, полімерних покриттів або твердих мастил.

2. Утворення плівок у разі гетерогенної будови матеріалу. Плівка утворюється внаслідок більшої податливості та здатності м'якої фази пластично деформуватися при менших навантаженнях, ніж міцніша структурна складова покриття, і видавлюватися за рахунок відмінності в коефіцієнтах лінійного розширення.

3. Тонкі, легко рухливі поверхневі плівки можуть також утворюватися за рахунок ефекту схоплювання з м'якою структурною складовою гетерогенного матеріалу.

4. Плівки можуть утворюватися також при сильному нагріванні контактних поверхонь, коли відбувається розм'якшення і розміцнення м'якої фази.

М'яку фазу в гетерогенному матеріалі можна отримати введенням у матеріал різних легкоплавких металів, які можна назвати АФП.

1.6 Висновки, мета та основні завдання досліджень

Проведений аналіз літературних джерел дозволяє зробити такі висновки.

1. Відновлення зношених деталей методом КН еластичних ППС з антифрикційними присадками є перспективним напрямом у створенні зносостійких покриттів.

2. Застосування як присадного матеріалу при відновленні зношених деталей контактним наварюванням ППС дозволяє спростити процес наварювання та наносити широкий спектр порошкових матеріалів.

3. Застосування АФП дозволяє зменшити коефіцієнт тертя і підвищити опірність схоплюванню поверхонь тертя.

Мета дослідження – розробка нових композиційних присадних матеріалів з поліпшеними триботехнічними властивостями, що застосовуються для відновлення зношених деталей контактним наварюванням.

Задачі дослідження:

1. Вивчити перспективи застосування композиційних матеріалів з АФП для відновлення зношених поверхонь.
2. Дослідити нові полімерні сполучні матеріали для ППС, що підвищують її технологічні властивості.
3. Розробити нові види ППС з антифрикційними присадками. Провести теоретичні дослідження раціональних режимів формування ППС.
4. Дослідити вплив складу ППС та режиму КН на структуру та механічні властивості КП.
5. Розробити технологію контактного наварювання ППС та оцінити економічну ефективність розробленого технологічного процесу.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обґрунтування вибору складу для композиційного матеріалу з антифрикційними присадками

Одним з перспективних матеріалів є зносостійкі порошкові матеріали. Слід зазначити, що можливості підвищення зносостійкості сталей та чавунів практично вичерпані. У той же час існує і застосовується дуже велика група матеріалів, в першу чергу порошкових, зносостійкість яких вище, ніж у легованих сталей. Порошкові покриття, отримані КН, за своєю природою мають найважливішу перевагу в порівнянні з наплавочними, оскільки вони копіюють спечений порошковий матеріал, отриманий методом порошкової металургії, тобто без досягнення у процесі утворення шару температур плавлення. Таким чином, при КН необхідно режим процесу регулювати так, щоб якнайменше розплавляти порошок. Відомо, що з плавленням значною мірою (на 20-30% і більше) втрачаються вихідні позитивні властивості порошків – твердість і зносостійкість, тобто характеристики, регламентовані при їх виробництві [18].

Застосування порошкових матеріалів при відновленні деталей дозволяє: скоротити втрати металу на утворення стружки під час механічної обробки; підвищити продуктивність процесу за рахунок скорочення механічної обробки та можливості автоматизації процесу наварювання; застосовувати порошкові матеріали, отримані переробкою машинобудівних та металургійних відходів (високий економічний ефект досягається при переробці стружкових, шматкових і шламових відходів інструментальних, шарикопідшипникових та ряду конструкційних легованих сталей); використовувати залишкову пористість у наплавленому шарі для утримування мастила у вузлах тертя, що дозволяє замінити дорогі леговані, зносостійкі сталі більш дешеві залізни порошки.

Головною ж перевагою металопорошкових композицій є можливість спрямованого формування необхідної структури присадного матеріалу, тим самим зробивши керованим процес отримання заданих фізико-механічних властивостей покриття, що наноситься.

Основними вимогами до матеріалів зносостійких деталей є достатня міцність, пластичність і зносостійкість, помірний коефіцієнт тертя. Ці властивості дозволяють забезпечити надійну експлуатацію важконавантажених вузлів тертя при граничному навантаженні.

Рекомендується при виборі матеріалів для пар тертя ковзання керуватися такими правилами [8, 15].

1. Поєднувати твердий матеріал з м'яким, що має температуру рекристалізації нижче середньої температури поверхні тертя. Пластичний матеріал, не наклепуючись при роботі і маючи найбільшу температуру на поверхні тертя, має позитивний градієнт механічних властивостей по глибині. Поєднання таких металів забезпечує добрий опір заїданню та характеризує високу надійність вузла тертя.

2. Поєднувати твердий матеріал з твердим (поєднання пар із загартованих, цементованих, азотованих сталей, хромованих, борованих і т.п. деталей). Такі пари тертя мають високу зносостійкість внаслідок малого взаємного занурення їх поверхонь. Нанесення приробітних покриттів підвищує надійність пар у найбільш небезпечний період роботи – під час припрацювання. Висока точність виготовлення та складання, значна жорсткість конструкції, ретельне припрацювання, поліпшення умов змащення значно розширює сферу застосування твердих пар тертя.

3. Уникати поєднань м'якого матеріалу з м'яким, а також пар з однойменних матеріалів – незагартованої сталі, алюмінієвих сплавів, мідного та алюмінієвого сплавів. Подібні пари мають низьку зносостійкість і ненадійні в роботі, при незначних перевантаженнях у парах утворюються ділянки захоплювання і відбувається глибинне виірвання матеріалів з їх взаємним налипанням на поверхні тертя. У важкодоступних для змащування

конструкціях рекомендується застосовувати пористі металокерамічні матеріали та антифрикційні сплави.

4. Застосовувати як фрикційні та антифрикційні матеріали пластичні маси. У ряді випадків вони підвищують надійність та термін служби, зменшують вагу конструкції та витрату дорогих дефіцитних металів, знижують вібрації та покращують акустичні властивості машин.

Беручи до уваги вищевикладене, а також дані з розділу 1.5, можна зробити висновок про можливість застосування порошкових матеріалів для КП з АФП. Як АФП можна застосувати м'які метали, наприклад, олово, свинець, мідь та інші, а також деякі полімери (політетрафторетилен, поліаміди та інші). Матрицею КП може бути недорогий залізний порошок типу "ПЖ". Матеріали на основі заліза є найпоширенішими антифрикційними матеріалами, що спікаються. Вони успішно конкурують з литими сплавами типу бронз і зі спеченими бронзами внаслідок недефіцитності вихідної сировини та можливості широкої зміни їх антифрикційних властивостей за рахунок легування та введення різних присадок. Антифрикційні властивості таких матеріалів мало відрізняються від властивостей пористого заліза та залізографіту і ці матеріали можуть застосовуватися при роботі з додатковим підведенням мастила та рідше в режимі самозмащування. Залізомідні матеріали, що містять більше 10% міді (до 70%), мають підвищену корозійну стійкість і за антифрикційними властивостями не поступаються бронзі. Як уже зазначалося в розділі 1.5 через відсутність літературних даних щодо застосування АФП у відновлюваних деталях, для аналізу застосування КП з АФП нами проводилася аналогія зі спеченими порошковими матеріалами, отриманими методами порошкової металургії.

При виборі компонентів для КП важливу роль грають розміри частинок. Використання дрібнодисперсних порошоків (менше 50 мкм) ускладнює формування ППС внаслідок їх схильності до злипання, викликаючи нерівномірність розподілу сполучного матеріалу в стрічці, що зменшує міцність ППС [17]. Використання крупних порошоків зумовлює формування грубої,

крупнозернистої структури з порами великих розмірів і неправильної форми, що обумовлює низькі механічні властивості КП. Зернистість порошку також впливає і коефіцієнт тертя. При граничних умовах роботи, коли температура поверхні тертя досягає 100°C, коефіцієнт тертя пористого заліза змінюється в залежності від величини частинок заліза таким чином [4]

Величина частинок заліза, мкм	60	.60-120	120	150
Коефіцієнт тертя	0,56	0,56	0,60	0,67

З урахуванням вищесказаного у роботі використовувалися такі металеві порошки (табл. 2.1)

Таблиця 2.1 – Характеристики порошків, що використовуються

Марка порошку	Насипна щільність, г/см ³	Гранулометричний склад Вміст частинок, %, мм			Хімічний склад Масова доля, %						
		от 0,16 до 0,2	от 0,045 до 0,16	менее 0,045	Fe	C	Si	Mn	S	P	O
ПЖРЗ. 200.28	2,8	6,5	76,9	16,6	99,4	0,04	0,06	0,14	0,02	0,02	0,32
		менше 0,45		менше 0,224	Cu не менше		Fe не більше		O		
ПМС-Н	2,5-3,5	5		95	99,5		0,08		0,03		
		менше 0,045		білше 0,071	Sn не менше		Pb		O		
ПО-1	3,0-4,0	85-95		2,5	99		0,25		0,5		

2.2 Розрахунок оптимальної кількості сполучного полімеру в композиційному матеріалі (ППС)

При прокатці через нагріті вальці порошку зі сполучним полімером формується ППС, при цьому кількість полімеру в стрічці сильно впливає на технологічні властивості ППС (міцність, гнучкість, електропровідність). Тому

попереднє розрахункове визначення оптимального інтервалу вмісту сполучного полімеру допоможе при пошукових експериментальних дослідженнях.

Розрахунок ґрунтується на припущенні, що при прокатці через нагріті вальці металевго порошку та полімеру, сполучний полімер заповнить пори, утворені частинками металевго порошку, при цьому чим повніше заповнені пори, тим міцніше та еластичніше ППС. Слід враховувати також, що для приварювання потрібна достатня електрична провідність стрічки, що досягається контактуванням металевих частинок. При цьому чим більше контактів, тим вища електрична провідність. Також однією з умов отримання якісного та міцного покриття є мінімальна його пористість [19]. Всі ці умови досягаються при максимально щільному пакуванні металевих частинок і найбільш повному заповненні наявних пор сполучним полімером.

Для розрахунку оптимальної кількості сполучного полімеру виділимо частину простору об'ємом V . Перебувають у цьому просторі сферичні частинки загальним об'ємом V_1 можуть мати координатне число λ від 0 до 12. Координатне число виражає кількість частинок, що знаходяться на найближчій і рівній відстані від будь-якої обраної частинки в об'ємі.

Пористість зазначеної частини простору дорівнюватиме

$$\Pi = 1 - \frac{V_1}{V}. \quad (2.2.1)$$

Зі зміною числа частинок у вибраній частині простору змінюватиметься і пористість

$$d\Pi = \frac{dV_{\text{пор}}}{V}. \quad (2.2.2)$$

Імовірність потрапляння об'єму $dV_{\text{пор}}$ у незайняту частинками частину виділеного простору $V_{\text{пор}} = V \cdot \Pi$, можна визначити за ймовірністю зміни координатного числа

$$\frac{d\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{dV_{\text{пор}}}{V_{\text{пор}}}, \quad (2.2.3)$$

де $\Delta\lambda$ – максимально можлива зміна координаційного числа λ , що дорівнює 8 (різниця найбільш щільно упакованої структури, $\lambda=12$ та структури з мінімальною просторовою стійкістю, $\lambda=4$).

Таким чином

$$\frac{d\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{dV_{\text{пор}}}{V_{\text{пор}}} = \frac{dV_{\text{пор}}}{V \cdot \Pi} = -\frac{d\Pi}{\Pi} \quad (2.2.4)$$

Інтегруючи диференціальне рівняння (2.2.4)

$$\int_{\Pi_{\text{max}}}^{\Pi} d\Pi / \Pi = \frac{1}{8} \int_0^{\lambda} d\lambda, \quad (2.2.5)$$

одержимо

$$\ln \Pi_{\text{max}} - \ln \Pi = 1/8\lambda, \quad (2.2.6)$$

де $\Pi_{\text{max}}=1$ – максимальна пористість,

звідки

$$\Pi = e^{-\lambda/8}. \quad (2.2.7)$$

Щільноупаковані структури, одержувані прокаткою чи пресуванням, характеризуються координаційним числом $\lambda=7-12$, тобто. $\Pi = 0,42-0,26$. Отже, при експериментальних дослідженнях слід шукати оптимальний вміст сполучного полімеру в інтервалі 42 - 26% від сумарного об'єму частинок залізного порошку та сполучного полімеру.

2.3 Розрахунок раціональних режимів прокатки порошково-полімерної стрічки

Для отримання якісної ППС необхідно вести процес прокатки стрічки за певної швидкості і температури, які є основними параметрами, що характеризують режим прокатки. Оскільки ці параметри мають впливати тільки на сполучний полімер, значення їх визначаються відповідно тільки властивостями сполучного полімеру. Найбільш значущим параметром є температура вальців, оскільки її варіюванням можна досягти різного стану сполучного полімеру.

Максимальне значення температури обмежується температурою деструкції полімеру, за якої відбувається руйнування макромолекул, у результаті чого полімер стає непридатним для практичного застосування. Мінімальне значення температури обмежується температурою склування, за якої відбувається затвердіння полімеру. Отже, температура вальців визначається температурою деструкції сполучного полімеру. Тому основним завданням розрахунку режиму прокатки є визначення швидкості руху вальців, за якої сполучний полімер досягне заданої температури в зоні мінімального зазору. Теплообмін суміші з навколишнім середовищем в об'ємі ВЕДС (рис. 2.1) у розрахунках не враховувався, що виправдано у зв'язку з малою площею (за товщиною суміші) теплообміну з навколишнім середовищем.

Для обчислення швидкості руху вальців скористаємося схемою прокатки (рис. 2.1).

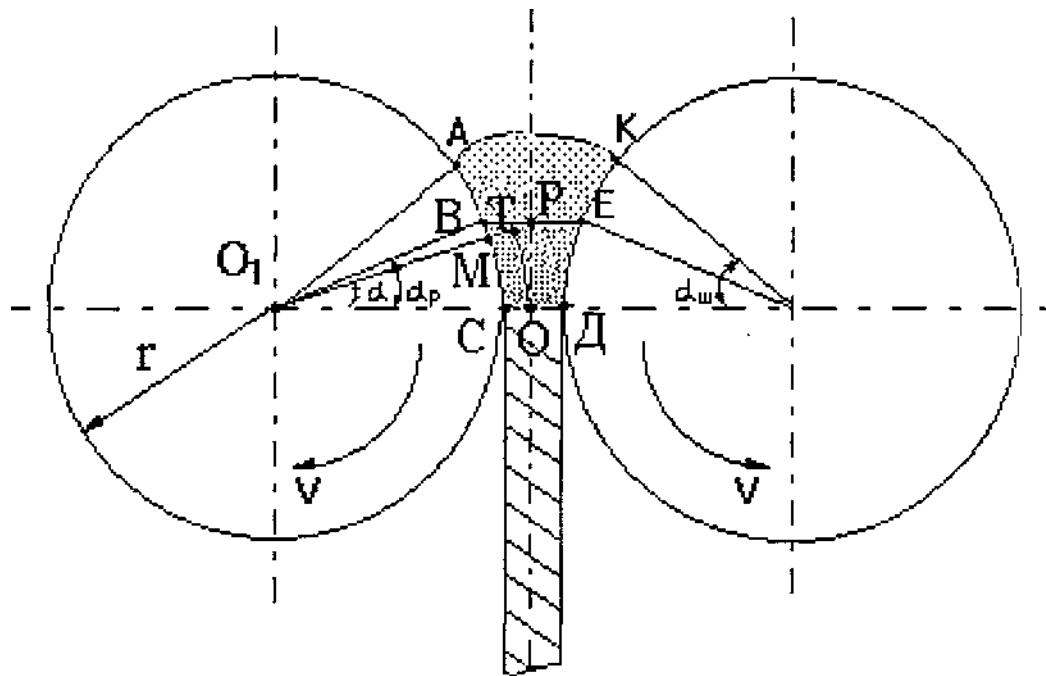


Рисунок 2.1 – Схема формування ППС

Нагрівання суміші відбувається на поверхні AC, обмеженій кутом $\alpha_{ш}$ (кут подачі), що визначається товщиною подачі суміші металевому порошку і

полімеру. Формування стрічки відбувається на довжині дуги ВС, обмеженої кутом α_p (кут прокатки). Таким чином обсяг, обмежений поверхнями ВС, СД, ДЕ, ЕВ, ущільнюється до товщини прокату.

Нагрівання суміші вище поверхні ВЕ не враховуємо, оскільки суміш нагрівається в цій ділянці нерівномірно, внаслідок безперервної подачі порошку з бункера.

Точка Р, рівновіддалена від обох вальців, у процесі прокатки доходить до точки О, тому швидкість руху вальців має дорівнювати швидкості нагрівання суміші від точки Р до точки О в процесі прокатки до заданої температури. Тому завдання зводиться до визначення часу, за який суміш у процесі прокатки від точки Р до точки О досягне заданої температури (температура початку повільної деструкції полімеру).

Для визначення шуканого часу спочатку визначимо час, за який суміш у точці Т і в точці О досягне заданої температури за нерухомих вальців. Для цього використаємо фізичну властивість речовини – температуропровідність, що характеризує швидкість вирівнювання температури в нерівномірно нагрітому тілі і дорівнює

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad [\text{м}^2/\text{сек.}], \quad (2.3.1)$$

Де ρ – густина речовини, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c – питома теплоємність, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$;

λ – теплопровідність, $\text{кВт}/\text{м} \cdot \text{К}$.

Вираз (2.3.1) являє собою площу вирівнювання температури за 1 сек. З огляду на те, що зі збільшенням щільності стрічки в процесі прокатки температуропровідність її також збільшується з $a_{\min}$ до $a_{\max}$, час вирівнювання температури від точки М до точки Т за нерухомих вальців складе

$$t_1 = \frac{\rho_1 c_1 S}{\lambda_1}, \quad (2.3.2)$$

де c_1 , ρ_1 , λ_1 – відповідно теплоємність, густина та теплопровідність суміші до прокатки;

S – площа поширення температури, м^2 .

Час вирівнювання температури від точки С до точки О відповідно складе

$$t_2 = \frac{\rho_2 c_2 S}{\lambda_2}, \quad (2.3.3)$$

де c_2 , ρ_2 , λ_2 – відповідно теплоємність, густина та теплопровідність суміші після прокатки.

Площа досліджуваної суміші дорівнює

$$S = S_{Q_{TO}} - S_{Q_{MC}} = 0,5\alpha(r + h/2)^2 - 0,5\alpha r^2 = \alpha(4rh + h^2)/8, \quad (2.3.4)$$

Де $h = 2CO = 10^{-3}$ м – половина товщини ППС.

За відсутності обертання вальців об'єм МТОС являє собою матеріал з рівною щільністю по всьому об'єму, тому температура поширюється від поверхні МС до поверхні ТО рівномірно. Під час обертання вальців, швидкість поширення температури підвищується зі збільшенням кута повороту вальця. Це відбувається тому, що суміш у процесі прокатки ущільнюється, внаслідок чого на відрізку МТ суміш має температуропровідність $a_{\min}$, а на відрізку СО – $a_{\max}$. При цьому прискорення поширення температури припускається постійним ($\omega = dv/dt = \text{const}$), оскільки швидкість обертання вальців постійна.

У результаті цих міркувань, для визначення шуканого часу можна використовувати середню швидкість поширення температури

$$t = \frac{CO}{v_{\text{сеп}}} = \frac{2CO}{(v_1 + v_2)}. \quad (2.3.5)$$

Звідси

$$t = \frac{2t_1 t_2}{t_1 + t_2} \quad (2.3.6)$$

Підставляючи у формулу (2.3.6) вирази (2.3.2), (2.3.3) і (2.3.4), отримуємо час нагрівання суміші до заданої температури в процесі прокатки від точки Р до точки О

$$t = \frac{\rho_1 \rho_2 c_1 c_2 \alpha (4rh + h^2)}{4(\lambda_2 \rho_1 c_1 + \lambda_1 \rho_2 c_2)} \quad (2.3.7)$$

або

$$t = \frac{\alpha(4rh + h^2)}{4(a_{\min} + a_{\max})}, \quad (2.3.8)$$

де $a_{\min}$ та $a_{\max}$ – відповідно температуропровідність суміші до прокатки та після.

Колова швидкість вальців визначається за виразом

$$\omega_b = \frac{60\alpha}{2\pi t} \quad [\text{хв.}^{-1}], \quad (2.3.9)$$

де α – кут обмежений дугою МС, рад.

Підставляючи (2.3.7) в (2.3.9) одержуємо

$$\omega_b = \frac{120(\lambda_2 \rho_1 c_1 + \lambda_1 \rho_2 c_2)}{\pi \rho_1 \rho_2 c_1 c_2 (4rh + h^2)}. \quad (2.3.10)$$

Для практичного застосування формули (2.3.10) необхідно знати температуропровідність ППС до прокатки і після неї, але ці значення невідомі і їх не можна виразити через температуропровідність компонентів, які входять до ППС, тому що в передаванні тепла композиційним матеріалом бере участь і теплообмін випромінюванням твердих стінок, що замикають собою повітряні та інші включення. Тому можна використовувати температуропровідність компонентів ППС, що мають мінімальне її значення. Так, до прокатки ППС можна використовувати значення температуропровідності сполучного полімеру, як компонента, що має мінімальну температуропровідність серед інших складових ППС до прокатки. Після прокатки для розрахунків можна використовувати температуропровідність повітря, що частково залишилося в ППЛ після прокатки. Тоді швидкість руху вальців, обчислена за цими значеннями, матиме мінімальне значення, тобто при будь-якій швидкості, яка дорівнює або нижча за ω_b , суміш, що прокатується, встигне нагрітися до температури вальців.

Необхідні дані для розрахунку формули (2.3.10) зведено в табл. 2.2, [56].

Таблиця 2.2 – Значення деяких теплофізичних властивостей полімерів і повітря

Фізичні властивості	ПВБ	ПВХ	Повітря
Густина, кг/м ³	1120	1400	1,166
Температура склування, °С	57	85	–
Температура початку повільної деструкції, °С	150-170	130-170	–
Питома теплоємність, Дж/кг·К	2300	1700	1000
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К	0,29	0,16	0,026

Таким чином, мінімальна швидкість вальців у разі використання в якості сполучного полімеру ПВБ становитиме $\omega_{в(ПВБ)} = 1.424 \text{ хв.}^{-1}$, а в разі використання ПВХ $\omega_{в(ПВХ)} = 1.421 \text{ хв.}^{-1}$. Невелика різниця між швидкостями $\omega_{в(ПВБ)}$ і $\omega_{в(ПВХ)}$ пояснюється невисокою різницею в температуропровідностях ПВБ і ПВХ.

2.4 Дослідження зміни стану полімерної частинки під час електроконтактного приварювання

Дослідження зміни стану сполучного полімеру під час КН має актуальне значення у зв'язку з можливістю створення композиційних покриттів із присадками антифрикційних полімерів.

У дослідженнях [4, 17], де як присадний матеріал при відновленні зношених деталей застосовували ППС, припускали, що сполучний полімер вигорає під час КН. На перший погляд це припущення не потребує доказу, адже температура в зоні приварювання може сягати 1400°C і більше, але внаслідок високих швидкостей нагріву (близько 10000...50000 °C/сек., [16]) та охолодження, а також низької теплопровідності полімеру це твердження може виявитися хибним при деяких режимах КН.

Під час контактного наварювання ППС внаслідок відсутності електропровідності в полімері лінії електричного струму огинатимуть його і проходитимуть через металеві частинки, в місцях контакту яких і виділяється

максимальна кількість теплоти, тому концентратори енергії перебувають поза контактом полімеру з металом. Необхідно також врахувати, що зниженню ефективності теплообміну між металевими частинками і полімером сприяє виділення газоподібних продуктів розкладання полімеру, коли його поверхня досягає температури початку термоокисної деструкції.

Для попередньої оцінки стану частинки полімеру в ППС під час КН прийнято таку модельну схему.

У зоні приварювання сферична частинка радіуса R нагрівається шляхом теплопровідності і на її поверхні підтримується температура T_c . Початкова температура частинки постійна і дорівнює температурі навколишнього середовища T_o .

Використовуючи дані роботи [10], можна визначити час нагрівання середини полімерної частинки до температури деструкції при нагріванні контактом

$$\tau = \frac{R^2}{\pi^2 a} \ln \left(2 \frac{T_c - T_o}{T_c - T_u} \right), \quad (2.4.1)$$

де R – середній радіус полімерної частинки, м;

a – температуропровідність, $\text{м}^2/\text{с}$;

T_u – температура в центрі полімерної частинки, $^{\circ}\text{C}$.

Радіус полімерної частинки в ППС лежить в інтервалі 0,025...0,15 мм. Значення температуропровідності можна обчислити, використовуючи дані таблиці 2.2.

Якщо температуру поверхні полімеру прийняти рівною 1000°C , то частинки ПВХ з радіусом понад 0,12 мм можуть повністю не вигоріти під час КН, якщо вони перебуватимуть у зоні приварювання менше 0,02 секунди, що цілком можливо за малої тривалості імпульсу струму та доброго охолодження.

У реальних умовах прийнята модель не цілком адекватна, оскільки температура на поверхні полімерної частинки постійно змінюється. Цю температуру в деякому наближенні можна представити лінійною функцією

часу $T_c(t) = T_0 + bt$. Коефіцієнт b визначається максимальною температурою в зоні приварювання ($T_{\max}$) і тривалістю імпульсу струму ($\tau_{\text{имп}}$) під час КН (рис. 2.2).

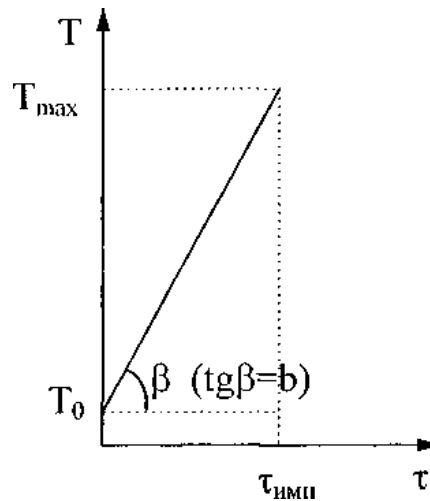


Рисунок 2.2 – Визначення коефіцієнта b

Під час нагрівання полімерної частинки тепловий потік спрямований до центру, а після припинення імпульсу струму, під час паузи, відбувається інтенсивне охолодження, у період якого тепловий потік спрямований від центру частинки, тобто під час паузи найбільш нагріті ділянки полімерної частинки (на периферії) не чинять істотного впливу на подальше розкладання полімеру. Отже, можна аналізувати зміну стану полімерної частинки тільки під час імпульсу струму.

З'ясувалось, що якщо максимальна температура в зоні контакту буде не більше 800°C , і тривалість імпульсів струму складе $0,02$ с, то після наварювання ППС з ПВХ можуть зберегтися частинки полімеру, що мають початковий діаметр не менше $0,28$ мм, причому після КН діаметр цих частинок не перевищить однієї третини від початкового.

Мікроструктурний аналіз на зламах покриттів з ППЛ, отриманих на вищевказаних режимах приварювання, виявив збереження не більше 5% від початкового об'єму полімерних частинок, і їхні розміри не перевищували в середньому $0,06$ мм.

Покриття, отримані на вищевказаних режимах КН, мали невисоку міцність зчеплення з основним металом деталі, що пояснюється насамперед невеликою величиною струму зварювання і тривалістю імпульсу струму, що робить їх незастосовними для відновлення автотракторних деталей. Збільшення тривалості імпульсу струму згідно з розрахунком спричиняє повне вигорання полімерних частинок (ПВБ і ПВХ) під час КН. Цей факт підтвердився і в результаті мікроструктурного дослідження.

Якщо при використанні як сполучного полімеру ПВБ і ПВХ неможливо одержати КП з достатньою міцністю зчеплення зі збереженням полімерних частинок, то, наприклад, при використанні такого антифрикційного полімеру, як політетрафторетилен, у якого температура термоокислювальної деструкції становить 425°C , товщина проплавленого шару в полімерній частинки може становити менше половини початкового радіусу частинки, за умови, що температура в зоні контакту може перевищувати 1000°C , тривалість імпульсу струму становити 0,06 сек., а величина струму 5,8 кА. Ці режими КН забезпечують достатню міцність зчеплення, що свідчить про можливість отримання металополімерних покриттів антифрикційного призначення з дисперсних матеріалів методом контактного наварювання. У цій роботі вплив сполучного полімеру (ПВБ і ПВХ) на антифрикційні властивості КП не вивчали, оскільки приварювання здійснювали на жорстких режимах, тобто за повного вигорання частинок полімеру. Дослідження ж більш термостійких полімерів для збереження полімерних частинок після КН, наприклад політетрафторетилену, не було метою цієї роботи, і це може слугувати основою для самостійного дослідження.

2.5 Висновки

Аналіз теоретичних досліджень дає змогу зробити такі висновки.

1. На підставі аналізу встановлено, що використання АФП (міді, олова, графіту, деяких полімерів тощо) у композиційних порошкових

матеріалах дає змогу зменшити коефіцієнт тертя, збільшити опір захопленню та підвищити зносостійкість сполучення.

2. Показано, що оптимальну кількість сполучного полімеру в ППС правильніше пов'язувати з координаційним числом λ , що, у свою чергу, пов'язане з пористістю порошкової композиції.

3. Встановлено, що швидкість обертання вальців при виготовленні ППС залежить тільки від теплофізичних характеристик компонентів ППС.

4. За результатами теоретичного дослідження зміни стану полімерної частинки при приварюванні встановлено, що за деяких режимів КН можуть зберігатися частинки зв'язуючого полімеру, що може бути основою для створення покриттів з термостійкими антифрикційними полімерами.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ПОРОШКОВОПОЛІМЕРНОЇ СТРІЧКИ ТА ЇЇ ВЛАСТИВОСТЕЙ, А ТАКОЖ ОДЕРЖАНИХ КОНТАКТНИМ НАВАРЮВАННЯМ ПОКРИТТІВ

3.1 Вплив складу порошковополімерної стрічки на її технологічні властивості та міцність зчеплення з основним металом

3.1.1 Спосіб отримання порошково-полімерної стрічки

ППС являє собою досить еластичний і міцний матеріал певної форми та розмірів (заданої товщини й ширини), у якому частинки металевого порошку з'єднуються між собою полімерною сполучною речовиною. Виготовити ППС можна різними способами, які мають спільну операцію зі змішування компонентів. Подальші етапи отримання ППС відрізняються один від одного. Можна сформувати суміш у вигляді тонкого шару за допомогою спеціального валика і помістити в піч, де відбуватиметься реакція полімеризації полімеру. Можна виготовити ППС звичайним пресуванням із нагріванням суміші або шляхом прокатки через нагріті вальці, причому прокатка є найпродуктивнішим способом, що характеризується високим ступенем автоматизації та безперервності процесу (рис. 3.1).

Основу ППС складають металеві струмопровідні порошки. Це є необхідною умовою, оскільки контактне наварювання відбувається під час проходження електричного струму через струмопровідну систему «ролик-електрод – ППС – деталь, що відновлюється, – ролик-електрод». Наразі як основний застосовують залізний порошок. Добавками до нього для поліпшення експлуатаційних властивостей здебільшого служать порошки твердих сплавів (карбідів титану, хрому і кремнію, оксиду алюмінію тощо), а також порошки, отримані з легованих сталей, порошки на нікелевій і нікелево-кобальтовій основах тощо. [1, 2, 18]. У нашій роботі як добавки до залізного порошку випробувані олов'яний і мідний порошки.



Рисунок 3.1 – Технологічна лінія для виробництва ППС

На першому етапі виготовлення ППС необхідно ретельно перемішати всі вживані металеві порошки.

На другому етапі виготовлення ППС необхідно підготувати полімерну складову. У нашому випадку це – змішування полімеру (ПВХ) з пластифікатором (ДОФ) у необхідних співвідношеннях (розділ 3.1.2) або виготовлення спиртового розчину плівки ПВБ граничної концентрації.

Після отримання полімерної складової, ретельно перемішують її з металевою композицією до отримання однорідної маси, яка завантажується в бункер для подальшого формування.

Для виготовлення ППС використовувався метод прокатки через нагріті вальці. На відміну від способів, де ППС поміщують у піч для полімеризації сполучного полімеру на 30...50 хвилин, метод виключає цю операцію, оскільки використовувався процес пластифікації ПВХ або випаровування розчинника зі

спиртового розчину плівки ПВБ. Для протікання цих процесів достатньо невеликого часу теплового впливу, з нагріванням до температури плавлення полімерів, але для прискорення вищевказаних процесів використовували нагрівання до температури початку повільної деструкції полімеру. Малий час пластифікації ПВХ, а також інтенсивне випаровування розчинника зі спиртового розчину ПВБ дають можливість використовувати ці полімери для виготовлення ППС методом прокатки через нагріті вальці.

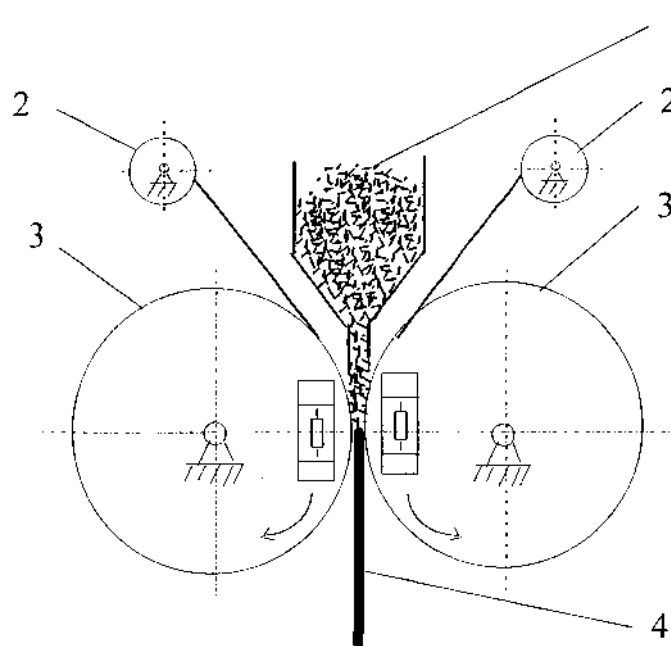
При використанні ППС як присадного матеріалу при КН потрібно застосовувати широкі ролики-електроди (ширина 10 мм) і нарізати стрічку на вузькі смуги (шириною 7-8 мм), а така технологія схожа з приварюванням дроту за гвинтовою лінією. Однак ця технологія характеризується низкою таких труднощів і недоліків: через невисоку міцність вузької смужки ППС, що зумовлено малими розмірами площі поперечного перерізу (близько 10... 20 мм² залежно від товщини), нерідко трапляються випадки її обриву під час наварювання; через відсутність чіткої межі наварювання неякісно формується стикова зона за гвинтовими лініями; внаслідок використання широких роликів-електродів збільшується теплове вкладення у відновлювану деталь, тобто знижується основна перевага КН. Тому нами пропонується використовувати новий вид ПП, армовану металевою сіткою, яка може прокочуватися разом із шихтою під час виготовлення стрічки.

Використання армуючої сітки дає змогу застосовувати звичайні вузькі ролики-електроди, які використовують під час КН сталевій стрічці, усуває необхідність розрізання ППС на вузькі смуги, обмежуючись різанням по ширині відновлюваної поверхні. Можна армувати стрічку металевою сіткою як з двох, так і з одного боку, причому в останньому випадку поверхня стрічки з сіткою має бути повернута під час приварювання до електрода, інакше ППС відокремлюється від сітки і рветься на межі наварювання внаслідок вигорання сполучного полімеру.

Як армувальну сталеву сітку використали сітку з конструкційної низьковуглецевої сталі марки 10кп, з діаметром дроту 0,3 мм і розміром комірок 1х1 мм.

Після змішування полімерної та металевої композицій суміш подавалася разом зі сталеву сіткою в міжвалковий зазор. Під час обертання нагрітих до температури 130-150°C валків відбувається обтиснення і витягування суміші в стрічку, а також пластифікація ПВХ (у разі застосування спиртового розчину плівки ПВБ відбувається інтенсивне випаровування спирту і згущення полімеру). У результаті цього металеві порошки зв'язуються між собою полімером, що заповнює в основному порожнини, утворені між частинками металевих порошків. Сітка, що прокочується разом із сумішшю, заформовується в порошкову суміш. Товщину стрічки можна регулювати зазором між валками.

Схема отримання армованої ППС наведена на рис. 3.2.



1 – бункер із шихтою; 2 – котушки з металевою сіткою; 3 – вальці з електронагрівачами; 4 – порошково-полімерна стрічка

Рисунок 3.2 – Схема одержання армованої порошково-полімерної стрічки

Товщина і щільність прокату залежать від хімічного і гранулометричного складу порошку, форми його частинок, конструкції дозатора порошку, тиску порошку на валки, стану поверхні валків і швидкості їхнього обертання, напряму прокатки та інших чинників. Оскільки швидкість прокатки в нашому

випадку визначається теплофізичними властивостями сполучного полімеру (розділ 2.3), то зміною режимів формування стрічки не можна регулювати щільність ППС. З цього випливає, що на пористість покриттів отриманих КН ППС не можна впливати зміною режимів формування стрічки.

Основними режимами формування стрічки є температура вальців і швидкість їх обертання. Обґрунтування і розрахунок прийнятих режимів зроблено в розділі 2.3. Отримані на цих режимах ППС відповідають прийнятому розрахунку. Про це свідчить дослідження поверхні ППСЛ під мікроскопом, яке показує відсутність продуктів розкладання полімеру і відсутність білих крупинок непластифікованого ПВХ.

За результатами експериментів з формування стрічки було встановлено, що порівняно з розрахунковими даними, на практиці можна дещо підвищити швидкість обертання вальців. Це, мабуть, пов'язано з тим, що в розрахунках використовували компоненти з мінімальним значенням температуро-провідності.

3.1.2 Дослідження технологічних властивостей порошково-полімерних стрічок та експериментальне визначення оптимальної кількості сполучного полімеру

Властивості покриттів, отриманих контактним наварюванням попередньо сформованих порошковополімерних стрічок, значною мірою залежать від технологічних властивостей ППС. Оскільки основою для отримання ППС слугує полімерна речовина, то видається вельми важливим визначити ті вимоги до неї, виконання яких забезпечує задані характеристики технологічних властивостей. На наш погляд, узагальнені вимоги до полімерної сполучної речовини такі.

1. Наявність адгезії до металевих порошків.
2. Еластичність.
3. Можливість формування ППС у результаті впливу тиску і (або) температури та збереження заданої форми протягом тривалого зберігання.

4. Можливість забезпечення мінімальної кількості сполучної речовини в ППС, порівнянне з існуючими аналогами.

5. Хімічна нейтральність до порошкових матеріалів.

6. Екологічність полімеру, тобто найменша токсичність продуктів його згоряння.

7. Доступність і низька вартість.

Згідно з [58], ППС можна отримувати наповненням еластичних полімерів порошками металів. Зазвичай порошки металів змішуються з рідкими кремнійорганічними (силоксановими) і поліуретановими композиціями та з пластифікованим полівінілхлоридом. Наприклад, у виробництві еластичних прокладок застосовують також вальцьовані суміші синтетичних каучуків і порошків металів. З еластичних металополімерів виготовляють також ізоляційні прокладки з підвищеною теплопровідністю, опором до стискаючих навантажень і зниженим коефіцієнтом тертя.

Завдання обґрунтованого вибору сполучного полімеру і визначення його кількості, що забезпечує заздалегідь задані раціональні технологічні властивості (міцність, гнучкість, електропровідність) ППС, має важливе й актуальне значення.

Для вибору потрібного сполучного полімеру на початковій стадії досліджень було визначено номенклатуру полімерів для пробних експериментів: подрібнені плівки з поліетилену, полівінілхлориду (ПВХ) та полівінілбутиралу (ПВБ), спиртовий розчин ПВБ, суміш суспензійного ПВХ і пластифікатора – діоктилфталату (ДОФ).

При приготуванні спиртового розчину ПВБ попередньо знайдена гранична концентрація плівки ПВБ у спирті. Для цього дрібні порції плівки поміщали в 96% спирт, постійно помішуючи розчин. При припиненні розчинення ПВБ у розчині фіксували кількість розчиненої плівки, при цьому враховували випаровування спирту під час експерименту. Для визначення впливу кількості полімеру на технологічні властивості ППС змішували певну кількість залізного порошку ПЖР 3.200.28 з різною кількістю спиртового

розчину ПВБ з граничною концентрацією. Масу плівки полімеру змінювали в інтервалі від 2 до 16 % від маси порошку. Під час прокатки цієї суміші через нагріті вальці спирт під впливом температури інтенсивно випаровувався з розчину, а полімер, що залишався, автоматично заповнював порожнечі спресованого порошку. З отриманих стрічок виготовляли зразки, які випробовували і порівнювали за значеннями технологічних властивостей: міцності (σ_p , МПа) та гнучкості (радіусу крихкого руйнування, $R_{кр.}$, мм).

Міцність стрічок визначали на розривній машині для випробовування зразків на розтяг (рис. 3.3)

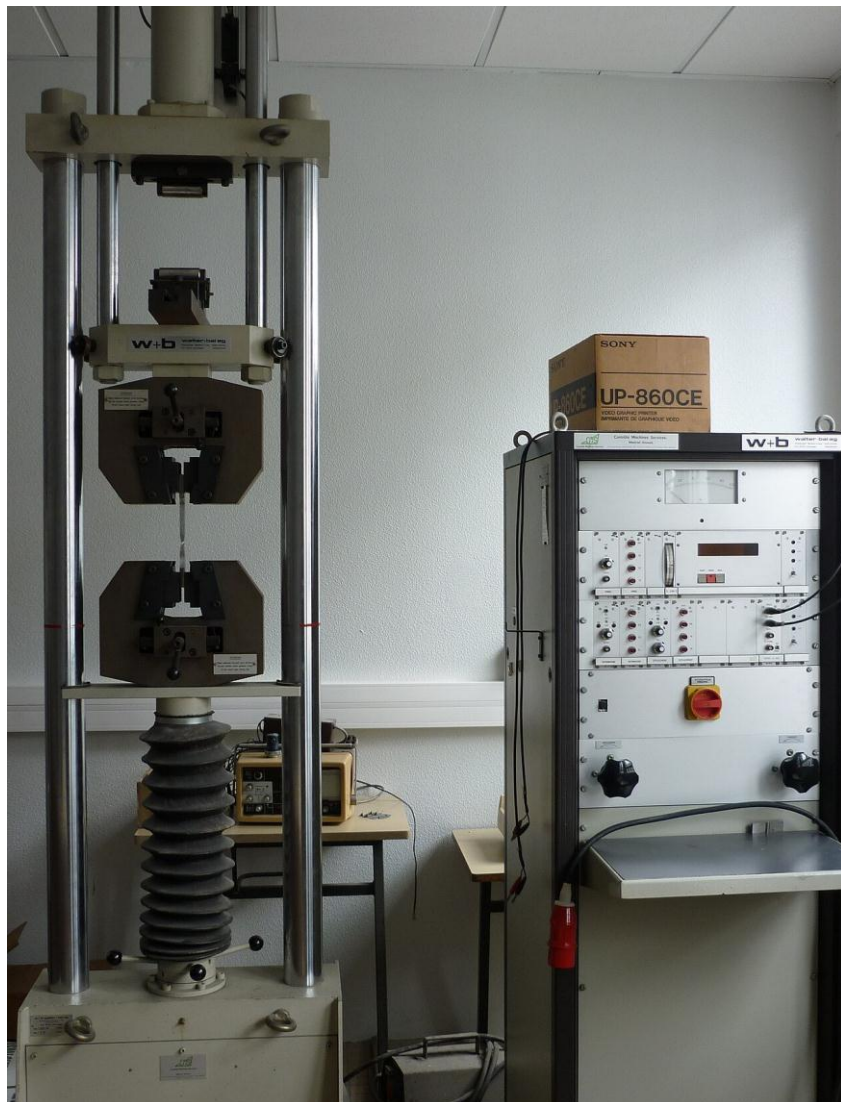


Рисунок 3.3 – Розривна машина для випробовування зразків на розтяг

Радіус крихкого руйнування (гнучкість) стрічки визначали за однократного огинання зразків навколо металевих циліндрів різного діаметру.

За критерій гнучкості приймали найменший радіус циліндра, за якого зразок не руйнувався.

Використання ПВХ як сполучного в чистому вигляді неможливе, оскільки він являє собою тонкодисперсний порошок і не має в цьому вигляді адгезії до металів. Тому до нього необхідно додавати пластифікатори, наприклад діоктилфталат (ДОФ), і стабілізатори. Стабілізатори виконують різні функції: поглинання хлористого водню, пригнічення деструкції, підвищення стійкості до світла та окислення тощо. Кількість стабілізатора, що вводиться в ПВХ, залежить від його природи і призначення полімеру. Для порошкоподібних стабілізаторів дозування не повинне перевищувати 5% від маси полімеру, оскільки, одночасно будучи і наповнювачем, ці стабілізатори можуть знизити механічні властивості матеріалу [4]. Як стабілізатори застосовувались стеарат кальцію і триосновний сульфат свинцю, які, наприклад, додають до ПВХ під час виготовлення кабельного, плівкового і литого пластикату, причому сумарна вагова їхня частка не перевищувала 1,5% (виробничі дані). Максимально допустиме дозування стеаратів для паст становить 0,5-0,6% у зв'язку з тим, що вони схильні до вицвітання на поверхні плівки [4]. Тоді вагова частка триосновного сульфату свинцю становитиме 0,9-1% від маси ПВХ.

Для визначення оптимальної кількості пластифікатора змінювали його кількість від 40 до 80% від маси полімеру (аналогічний інтервал застосовують під час виробництва різних виробів із ПВХ). Масу суміші ПВХ, пластифікатора і стабілізатора змінювали від 3 до 11 % від маси металевих порошків (призначали, виходячи з результатів попередніх дослідів).

Експерименти з подрібненими полімерами позитивних результатів не дали, а експерименти зі спиртовим розчином плівки ПВБ і сумішшю ПВХ і ДОФ показали хороші результати.

Вплив кількості полімеру на міцність стрічки показано на рис. 3.4. Залежність можна представити лінійною функцією $y = 0,839x - 0,194$.

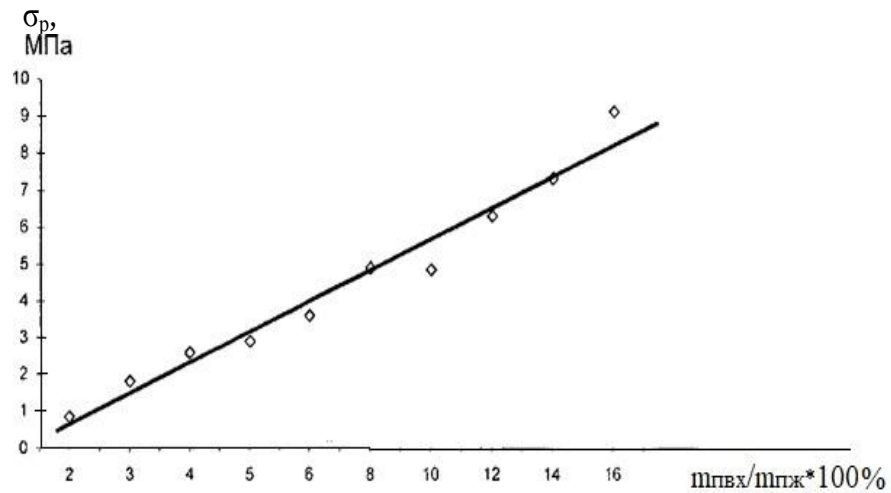


Рисунок 3.4 – Залежність міцності ППС від відносної кількості сполучного полімеру (ПВБ)

Залежність гнучкості від кількості сполучного полімеру (рис. 3.5) можна представити функцією другого порядку $y = 1,174x^2 - 21,347x + 100,1$.

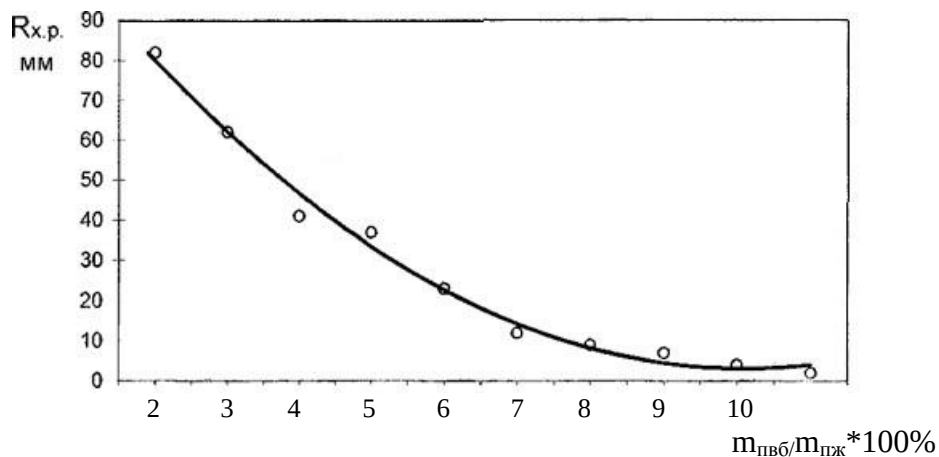


Рисунок 3.5 – Залежність гнучкості ППС від відносної кількості сполучного полімеру (ПВБ)

Значне погіршення гнучкості за кількості сполучного полімеру менше 6% зумовлене тим, що зв'язок між металевим порошком і полімером на цьому інтервалі більшою мірою залежить від адгезійної взаємодії між полімером і порошком, а також від відносно невеликої рухомості частинок порошку, а за кількості сполучного більше 7% радіус крихкого руйнування більшою мірою залежить від еластичних властивостей самого полімеру. При цьому очевидно,

що за деякої кількості сполучного, радіус крихкого руйнування дорівнюватиме нулю.

За графіками на рисунках 3.4 і 3.5 можна визначити необхідну кількість сполучного полімеру (ПВБ) для ППС із заданими технологічними властивостями (міцністю і гнучкістю). Проте за такої кількості сполучного полімеру після приварювання ППС на деталь когезійна та адгезійна міцність майбутнього покриття може вийти невисока. Тому необхідно узгоджувати кількість сполучного полімеру не тільки з міцністю і гнучкістю ППС, а й з механічними та експлуатаційними властивостями майбутнього покриття.

Як уже зазначалося, для використання ПВХ як сполучного полімеру необхідно додавати до нього пластифікатор, який в основному визначає пластичні властивості полімеру. Для визначення впливу пластифікатора і ПВХ на технологічні властивості ППС було проведено двофакторні експерименти, результати яких представлено на рисунках 3.6 і 3.7.

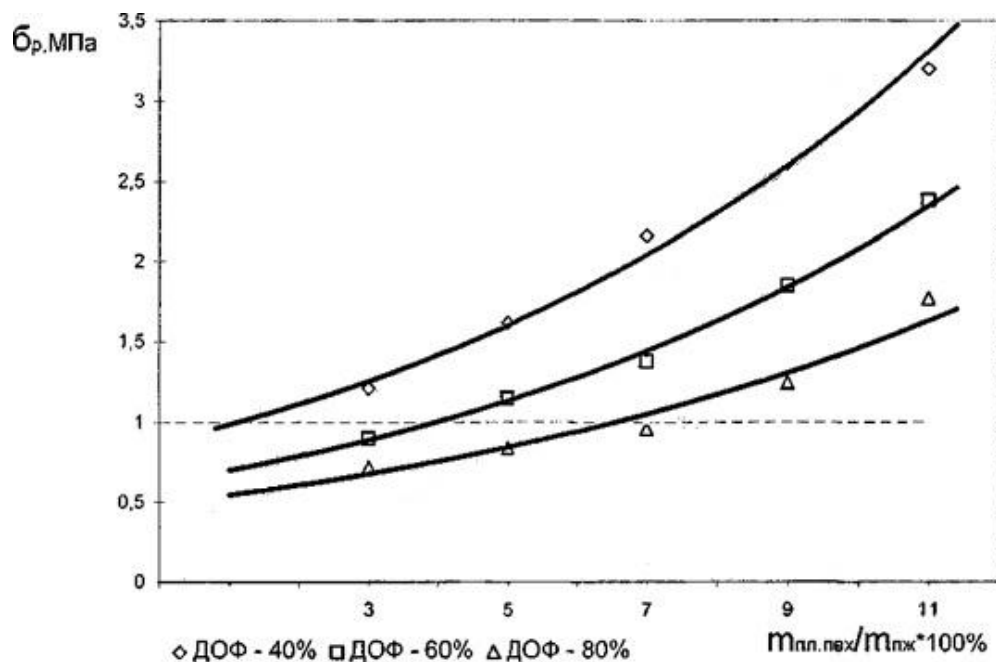


Рисунок 3.6 – Вплив відносної кількості пластифікованого ПВХ на міцність ППС

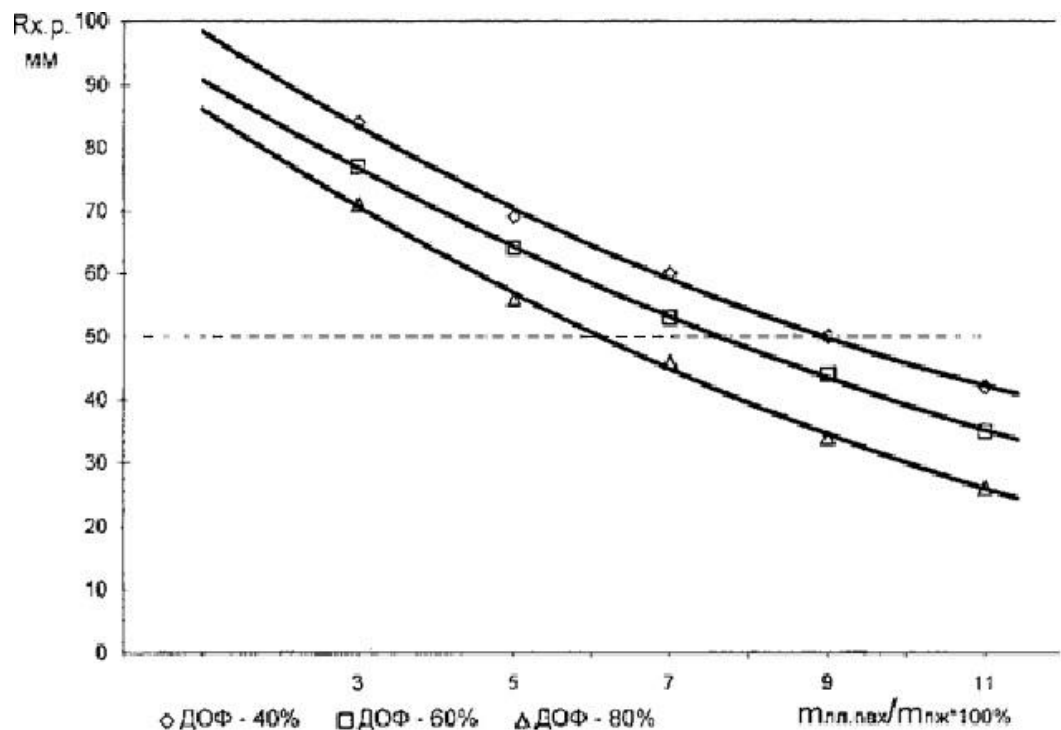


Рисунок 3.7 – Вплив відносної кількості пластифікованого ПВХ на гнучкість ППС

Важливо відзначити, що при визначенні значень технологічних властивостей ППС і їх порівнянні необхідно керуватися положенням, яке випливає зі сформульованих вище вимог до полімерного сполучного. З одного боку, для того, щоб негативний вплив сполучного полімеру на умови протікання КН ППС був мінімальним, його кількість має бути найменшою. З іншого боку, кількість сполучного має бути достатньою для підтримки значень технологічних властивостей ППС на заданому рівні.

Вибір необхідної міцності ППС визначається можливістю її наварювання, транспортування і зберігання. Технологічні властивості ППС також можуть визначатися сферою її застосування: у виробництві чи для лабораторних досліджень. Під час роботи з'ясувалося, що стрічка, яка має міцність більше 1МПа і радіус крихкого руйнування не більше 50 мм, є придатною для подальшого застосування.

Для визначення оптимальної кількості полімеру і пластифікатору використовували графічний метод, як найпростіший і наочний. За точками

перетину горизонтальних ліній, що вказують на необхідні властивості ППС, з графіками (рис. 3.6 і 3.7) будували дві нові залежності кількості сполучної речовини від кількості пластифікатора, наприклад, за $\sigma_p=1\text{МПа}$ і $R_{x.p}=50\text{ мм}$ (рис. 3.8). Точка перетину двох кривих показує оптимальну кількість пластифікованого ПВХ і пластифікатору.

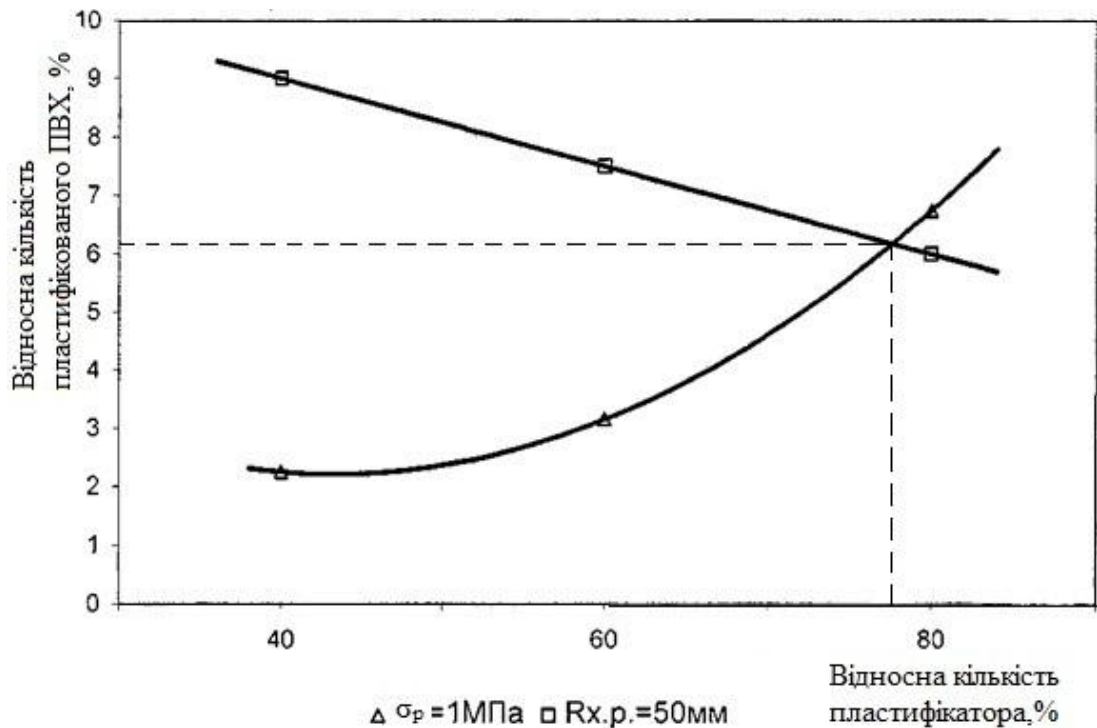


Рисунок 3.8 – Визначення оптимальної кількості пластифікованого ПВХ і пластифікатору

3.1.3 Визначення режимів контактного наварювання ППС

Вплив режимів КН (величини зварювального струму – $I_{зв.}$, тривалості імпульсу струму – $t_{імп.}$, тиску роликів-електродів – P) на міцність зчеплення покриття (τ) з основним металом деталі розглядали в багатьох роботах [2, 18]. Збільшення будь-якого із зазначених вище параметрів приварювання викликає підвищення міцності зчеплення. Безумовно, наявність АФП у покритті буде також впливати на міцність зчеплення, але характер залежності її від режимів КН має залишитися колишній.

Оптимальні режими приварювання визначали за критерієм τ , причому кількість АФП і сполучного полімеру призначали максимальними, тому що за

результатами пошукових експериментів за менших кількостей АФП і полімеру в ППС міцність зчеплення збільшується. Максимальна кількість сполучного полімеру при визначенні оптимальних режимів приварювання становила 15% від загальної маси. За більшого вмісту полімеру (понад 20%) відбувається сильна усадка ППС під тиском роликів-електродів і покриття виходить дуже тонким (менше ніж 0,2 мм при приварюванні стрічки товщиною 2 мм). Поряд з цим значно погіршується зчеплення.

Максимальна кількість АФП – порошок міді або олова відповідно становила 20 і 10% від загальної маси, за більшого вмісту мідного порошку в ППС зменшується її питомий електроопір, і в контакті частинок Fe-Cu зварюваність утруднена.

Були підібрані оптимальні режими приварювання ППС з АФП: величина сили струму 7,5...8 кА, тривалість імпульсу зварювання 0,04 с, тривалість паузи 0,06 с, тиск роликів-електродів 0,4 МПа. Частота обертання деталі становила 2 хв^{-1} , наварювання велося на зразки діаметром 50 мм, товщина ППС становила 1,0...1,2 мм. Цей режим приварювання є жорстким, оскільки характеризується високою величиною струму і малою тривалістю імпульсу і паузи, він також характеризується відносно високим тиском на ролики-електроди.

3.2 Дослідження властивостей композиційного покриття з антифрикційними присадками

3.2.1 Вплив антифрикційних присадок на триботехнічні характеристики композиційного покриття і сполучення в цілому

Як АФП нами були випробувані порошки міді та олова, їхні характеристики наведені в таблиці 2.1. Як сполучний полімер для ППЛ застосовували ПВБ. Трибологічні випробування проводилися на машині тертя СМЦ-2 згідно зі схемою, зображеною на рис. 3.9. Результати досліджень представлені у вигляді діаграм на рис. 3.10.

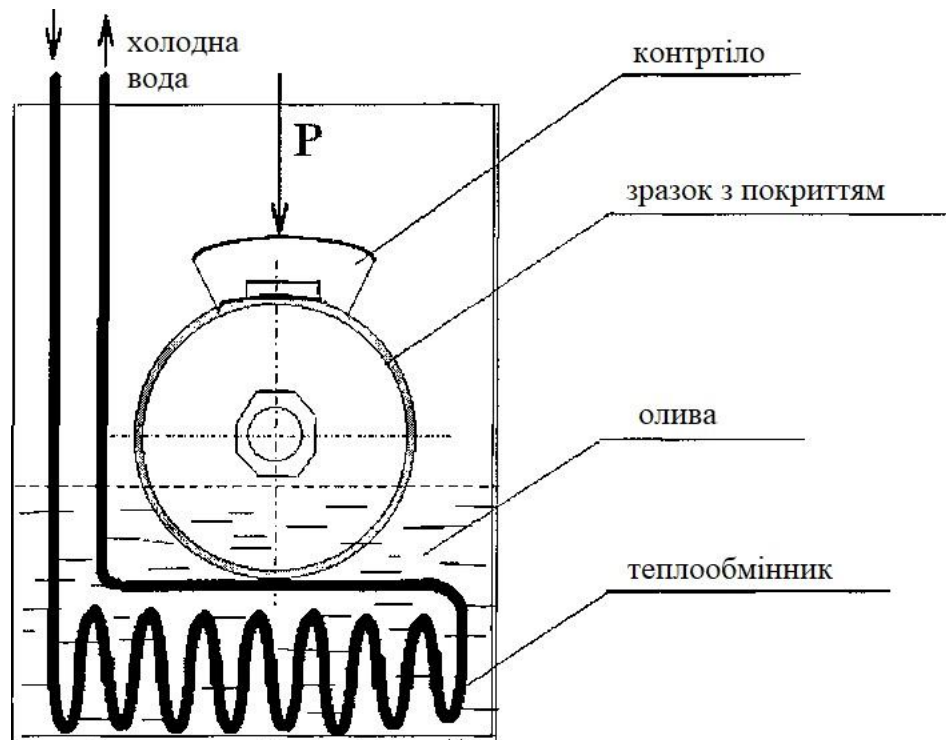
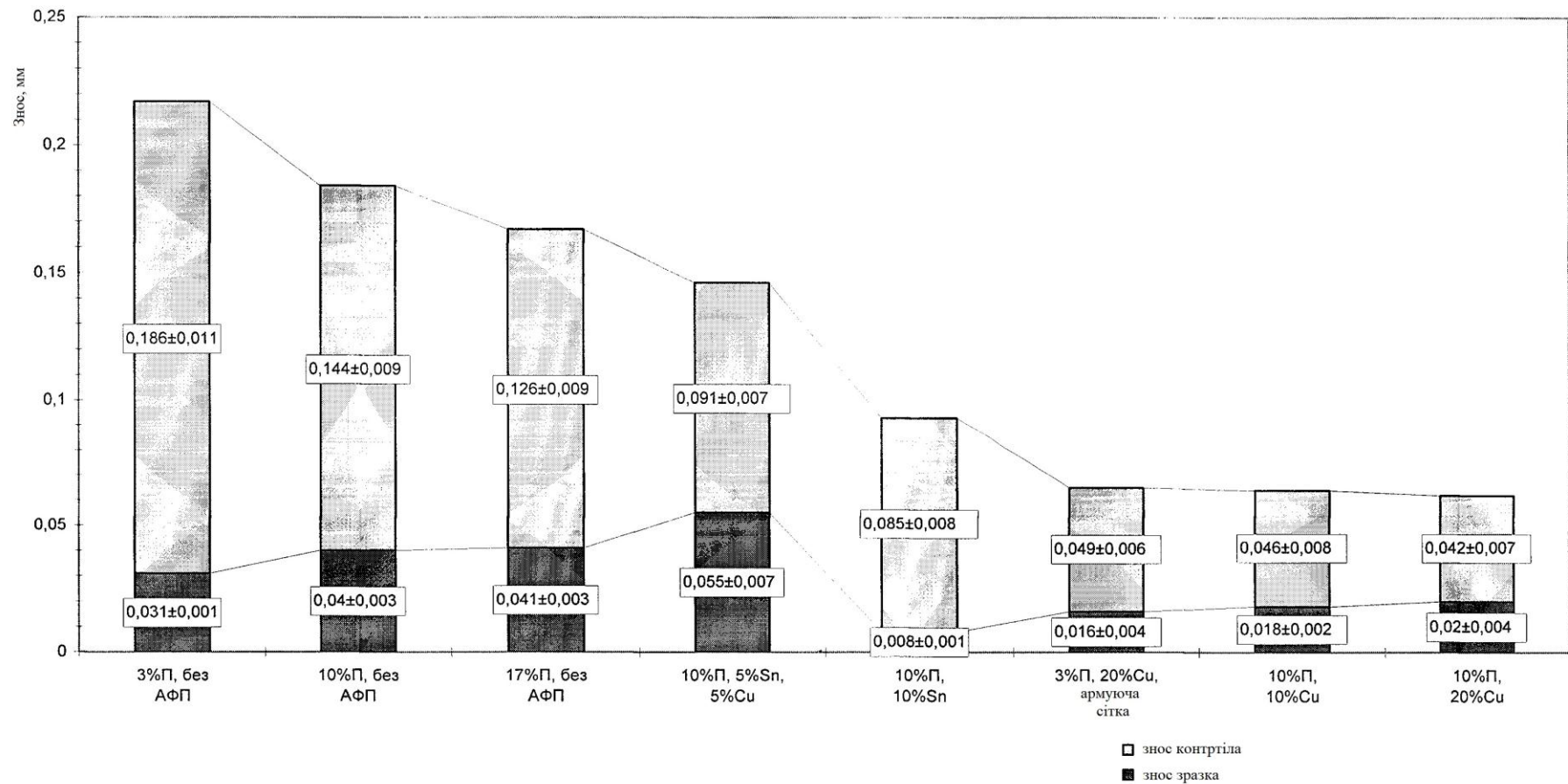


Рисунок 3.9 – Схема випробувань зносостійкості

Як видно з діаграми (рис. 3.10), найменший знос мають КП з оловом, а найбільший знос має КП з поєднанням олова і міді.

За впливом дослідних покриттів на сполучений матеріал (колодочки із сірого чавуну) виявлено, що найменший знос спостерігається у колодочок, які працювали в парі з КП з найбільшим вмістом міді (20%). Найбільше зношування контртіла спостерігалось у колодок, що працювали в парі з КП без присадок і з найменшим вмістом сполучного полімеру, тобто покриття з найменшою пористістю, а отже, і з найбільшою міцністю (таблиця 1.2). Знос контртіла зменшується зі збільшенням сполучного полімеру, тобто зі збільшенням пористості КП, а також зменшується із введенням АФП.

Оцінюючи спрацювання сполучення в цілому, видно, що КП з найбільшим вмістом міді, також мають мінімальне спрацювання, при цьому максимальне спрацювання має сполучення без антифрикційних присадок з мінімальним вмістом полімеру (3%).



П – полімер, АФП – антифрикційні присадки (Cu – мідь, Sn – олово), решта – залізний порошок

Рисунок 3.10 – Залежність зносу зразка та контртіла від складу композиційного покриття

За результатами триботехнічних випробувань можна виділити оптимальний склад для композиційного матеріалу: 80 % (за масою) залізного порошку (ПЖР 3.200.28), 20 % порошку міді (ПМС-Н), армувальна сталева сітка, 3 % (від маси металевого порошку) сполучного полімеру (ПВБ).

3.3 Висновки

Аналіз результатів досліджень дає змогу зробити такі висновки:

1. З'ясовано, що процес отримання ППС прокаткою через нагріті вальці є найбільш технологічним і продуктивним способом.

2. Розроблений спосіб армування ППС сталеву сіткою дозволяє спростити процес її контактного наварювання на поверхні деталей обертання.

3. Для якісного приварювання ППС з АФП необхідно використовувати більш жорсткі режими, ніж при приварюванні сталеві стрічки. Отриманий оптимальний режим такий: $I=7,5\ldots 8$ кА, $t_{\text{імп}}=0,04$ с, $t_{\text{паузи}}=0,06$ с, $P=12,5$ кН, за частоти обертання деталі діаметром 50 мм – 2 хв^{-1} і товщини стрічки 1,0...1,2 мм.

4. КП з присадками або олова, або міді мають знос за час випробувань більш ніж у 2 рази менший, ніж знос КП без присадок. Наявність АФП зменшує також коефіцієнт тертя в сполученні приблизно в 1,5 разу.

5. Збільшення кількості сполучного полімеру в стрічці пропорційно збільшує пористість покриття, одержаного КН ППС.

6. Виявлено, що за деяких режимів КН сполучний полімер у ППС повністю не вигорає.

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ КОНТАКТНИМ НАВАРЮВАННЯМ ПОРОШКОВОПОЛІМЕРНОЇ СТРІЧКИ

4.1 Технологічний процес та аналіз ефективності відновлення розподільного вала двигуна Д-240 контактним наварюванням порошковополімерної стрічки

Ефективність застосування контактного наварювання порошково-полімерної стрічки розглянемо на прикладі відновлення розподільного вала двигуна Д-240.

Розподільний вал двигуна Д-240 має довжину 620 мм, виготовляється із легованої сталі підвищеної міцності методом об'ємного штампування. На нього напресовано 8 робочих кулачків, необхідні взаємодії з штовхачами клапанів сільськогосподарської техніки МТЗ (таблиця 4.1). Завдяки обертовому руху від колінвала вони передають імпульси на відкриття та закриття клапанів у потрібні фази циклу.

Таблиця 4.1 – Параметри розподільного вала двигуна Д-240

Параметр	Значення
Діаметр / кількість опорних шийок	50мм / 3
Число кулачків	8
Матеріал / спосіб кріплення кулачків	сталь / напресування

Для відновлення розподільного вала можна рекомендувати технологічний процес, схема якого наведена на рис. 4.1.

Для оцінки економічної ефективності відновлення визначаємо матеріальні витрати

$$B_m = B_c \cdot K_{\text{ТЗВ}}, \quad (4.1)$$

де B_c – вартість виготовленої порошковополімерної стрічки, необхідної для відновлення розподільного вала;

$K_{\text{тзв}}$ - коефіцієнт, що враховує транспортно-заготівельні витрати.

$$B_m = 68,22 \cdot 1,1 = 75,05 \text{ грн.}$$



Рисунок 4.1 – Технологічний процес відновлення розподільних валів двигуна Д-240 КН ППС

Трудовіткість відновлення розподільного вала та зарплата робітників наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Трудовіткість відновлення розподільного вала КН ППС

Найменування операції	Трудовіткість операції, люд-год.	Розряд робіт	Годинна тарифна ставка, грн/год.	Заробітна плата, грн.
Зварювальна (КН ППС)	1,02	IV	75,37	76,88
Шліфувальна	1,36	IV	75,37	102,51
Всього				179,39

Витрати на оплату праці робітників з нарахуванням додаткової заробітної плати у розмірі 10% [6, 7]:

$$B_3 = Z_{\text{п}} + 0,1 \cdot Z_{\text{п}} \quad (4.2)$$

$$B_3 = 179,39 + 0,1 \cdot 179,93 = 197,33 \text{ грн.}$$

Визначаємо відрахування до єдиного соціального внеску (для ФОП – 22%):

$$B_{\text{соц}} = 197,33 \cdot 0,22 = 43,42 \text{ грн.}$$

Визначаємо накладні витрати:

$$B_{\text{н}} = K_{\text{н}} \cdot B_3 \quad (4.3)$$

$$B_{\text{н}} = 0,5 \cdot 197,33 = 98,67 \text{ грн.}$$

Таким чином, собівартість відновлення розподільного вала двигуна Д-240 КН ППС

$$C = B_{\text{м}} + B_3 + B_{\text{соц}} + B_{\text{н}} \quad (4.4)$$

$$C = 75,05 + 197,33 + 43,42 + 98,67 = 414,47 \text{ грн.}$$

Ціна нового розподільного вала двигуна Д-240 складає $C = 2600$ грн., тобто економічний ефект відновлення одного розподільного вала складе 2185,53 грн.

Економічний ефект відновлення за рахунок збільшення довговічності відновлених деталей [7, 8]

$$E = \frac{C}{P_{\text{н}}} - \frac{C}{P_{\text{в}}} \quad (4.5)$$

де C – ціна нової деталі, $P_{\text{н}}$, $P_{\text{в}}$ – ресурс відповідно нової та відновленої деталі, $P_{\text{н}} = 1$.

$$E = \frac{2600}{1} - \frac{414,47}{1,5} = 2323,69 \text{ грн..}$$

4.2 Висновки

Очікуваний економічний ефект відновлення одного розподільного вала складає 2185,53 грн. Економічний ефект відновлення з урахуванням збільшення довговічності відновлених деталей складає 2323,69 грн.

ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу літературних джерел встановлено, що використання АФП (міді, олова, графіту, деяких полімерів тощо) у композиційних порошкових матеріалах дає змогу знизити коефіцієнт тертя, збільшити опір захопленню та підвищити зносостійкість сполучення.

2. Досліджені нові сполучні полімери підвищують технологічні властивості ППС. Показано, що використання як сполучного полімеру спиртового розчину плівки ПВБ підвищує міцність і зменшує радіус крихкого руйнування ППС порівняно з використанням ПВХ.

3. Встановлено, що композиційні покриття з АФП забезпечують підвищення зносостійкості більш, ніж у 2 рази порівняно з КП без присадок;

4. Розроблено нові види ППС. Проведено теоретичні дослідження раціональних режимів формування ППС.

5. Розрахункові величини швидкості прокатки ППС узгоджуються з експериментальними даними. Встановлено, що швидкість обертання вальців при формуванні стрічки залежить тільки від теплофізичних властивостей компонентів ППС.

6. Встановлено, що при збільшенні кількості сполучного полімеру в стрічці пропорційно збільшується пористість покриття, отриманого КН ППС.

7. Розроблено технологічний процес відновлення опорних шийок розподільного вала двигуна Д-240 методом контактного наварювання ППС з АФП. Очікуваний економічний ефект від упровадження технологічного процесу відновлення шийок розподільного вала складе 2323,69 грн.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аулін В.В., Василенко І.Ф., Красота М.В. Теоретичне обґрунтування експлуатаційних властивостей деталей автомобілів, зміцнених композиційними покриттями, методом кластерних компонентів. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. Вип. 3(34). С. 54-65. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).54-65](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).54-65)
2. Василенко І.Ф. Фізичні процеси при формуванні композиційних покриттів контактним наварюванням. Збірник наукових праць КНТУ «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація». Кіровоград: КНТУ, 2016. Вип. 29. С. 111-117.
3. Денисенко М.І. Підвищення технічного ресурсу і довговічності робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин / Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 5 (36). С. 40-47. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.40-47](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.40-47)
4. Джурка Г.Ф. Полімерні композиційні матеріали. Полтава, 2008. 58 с.
5. ДСТУ 2823-94. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1996. 18с.
6. Економіка підприємства / С.М. Рогач [та ін.]; Нац. Ун-т біоресурсів і природокористування України. К.: КОМПРИНТ, 2015. 391 с.
7. Економіка підприємства: навчальний посіб. для студентів закл. вищ. освіти / Н.М. Колпаченко, Ю.А. Сайчук, В.К. Аветісян, В.А. Бантковський, В.Л. Маніло. Харків: Діса плюс, 2019. 277 с.
8. Закалов О.В., Закалов І.О. [Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулую, 2011. 322 с.](#)
9. Константінов С. М., Панов Є. М. Теоретичні основи теплотехніки: підручник. К.: Золоті ворота, 2012. 592 с.
10. Лабай В. Й. Тепломасообмін. Л.: Тріада Плюс, 1998. 260 с.

11. [Лауш П.В.], Василенко І.Ф., Лесюк Т.П. та ін. Технічне обслуговування та ремонт сільськогосподарської техніки. Кіровоград: ПОЛІМЕД-Сервіс, 2007. Ч.І, 416 с.

12. [Лауш П.В.], Василенко І.Ф., Лесюк Т.П. та ін. Технічне обслуговування та ремонт сільськогосподарської техніки. Кіровоград: ПОЛІМЕД-Сервіс, 2007. Ч.ІІ, 444 с.

13. Лівіцький О.М. Вдосконалення технічного сервісу автотракторної техніки в умовах агропромислового виробництва. Центральнотуристський науковий вісник. Технічні науки. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 4 (35). С. 189-197. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).189-197](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).189-197)

14. Методичні вказівки для виконання випускної дипломної роботи для здобувачів освітньо-професійної програми «Технічний сервіс сільськогосподарської техніки» другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 208 – «Агроінженерія» денної та заочної форми навчання / уклад.: О.В. Бевз, С.О. Магопєць, І.В. Шепєленко, М.В. Красота, Р.А. Осін, О.В. Дмитренко. Кропивницький: ЦНТУ, 2024. 39 с

15. Основи трібології: Підручник / А.М. Антипенко, О.М. Белас, В.А. Войтов та ін. / За ред. Войтов В.А. Харків: ХНТУСГ, 2008. 342с.

16. Ремонт машин та обладнання: підручник / О.І. Сідашенко, О.А. Науменко, Т.С. Скобло, О.В. Тіхонов та інш.; за ред. О.І. Сідашенка, за ред. О.А. Науменка; ХНТУСГ. 2-ге вид., перероб. і доп. К. : Агроосвіта, 2014. 665 с.

17. Федорченко І.М., Пугіна Л.І. Композиційні спечені антифрикційні матеріали. К.: Наукова думка, 1980. 403 с.

18. Черновол М.І., Сало В.М., Мачок Ю.В. та ін. Забезпечення довговічності робочих органів загортаючих систем посівних машин / М.І. Черновол, В.М. Сало, Ю.В. Мачок, П.Г. Лузан, С.В. Мартиненко. Кіровоград: СПД ФО Лисенко В.Ф., 2012. 148 с.

19. Черновол М.І., Шепеленко І.В. Системний підхід до формування показників якості відновлених деталей. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. Вип. 7 (38). С. 30-36.
DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.30-36](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.30-36)