



ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА
ЕНЕРГЕТИКИ



КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

**«Дослідження раціональних параметрів нанесення газотермічних
покриттів на поверхні валів у ТОВ «Ремсинтез»
м. Кропивницький»**

Виконав:

магістрант групи АТ23М-1 спеціальності 274
«Автомобільний транспорт» ОПП
«Автомобільний транспорт»

_____ Дмитро ВЕРДИШ

Керівник:

к.т.н., доцент _____ Сергій МАГОПЕЦЬ

«ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри:

к.т.н., доцент _____ Сергій МАГОПЕЦЬ

«__» _____ 2024 р.

Рецензент:

_____, _____ (підпис) _____ (ім'я та прізвище)
(наук. ст., вч. звання)

«__» _____ 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: 27 «Транспорт»

Спеціальність: 274 «Автомобільний транспорт»

Освітньо-професійна програма: «Автомобільний транспорт»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри «Експлуатація та
ремонт машин»

_____ Сергій МАГОПЕЦЬ
«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Вердишу Дмитру Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи «Дослідження раціональних параметрів нанесення газотермічних покриттів на поверхні валів у ТОВ «Ремсинтез» м. Кропивницький»

керівник роботи МАГОПЕЦЬ Сергій Олександрович, к.т.н, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові)

(науковий ступінь) (вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «__» _____ 2024 року № _____

2. Строк подання здобувачем роботи «30» листопада 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Матеріали переддипломної практики

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

4.1. Розділ 1. Дослідити особливості організації та ефективність діяльності підприємства ТОВ «Ремсинтез»; визначити пріоритетні напрямки виробничої діяльності; обґрунтувати тему роботи, визначити її мету, об'єкт та предмет досліджень, задачі потрібні для подальшого вирішення.

4.2. Розділ 2. Дослідити особливості формування плазмових покриттів при застосуванні додаткових способів активування процесу напилення; навести необхідне обладнання та режими формування зносостійких покриттів; розробити фізичну модель трансформації дуги та потоку плазми у плазмотроні під дією зовнішніх збурюючих факторів; виконати оцінку впливу активних полів на параметри потоку плазми в плазмотроні; дослідити ефективність процесу та якість напилених покриттів.

4.3. Розділ 3. Навести методику, обладнання та режими попередньої підготовки поверхні перед напиленням плазмового покриття; оцінити вплив попередньої підготовки поверхні на фізико-механічні властивості покриттів отриманих на поверхнях деталей плазмовим напиленням.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

5.1. Результати аналізу ефективності функціонування ТОВ «Ремсинтез». 5.2. Обґрунтування актуальності наукових досліджень. Об'єкт, предмет, мета й задачі досліджень. 5.3. Технічні характеристики та режими роботи установки для плазмового нанесення покриттів. 5.4. Фізична модель зміни положення дуги та потоку плазми у плазмотроні під впливом активних силових полів. 5.5. Результати оцінки дії активних силових полів на параметри потоку плазми. 5.6. Оцінка ефективності та якості процесу плазмового напилення покриттів. 5.7. Дослідження міцності зчеплення напиленого покриття із поверхнею деталі при різних способах попередньої підготовки цієї поверхні. 5.8. Загальні висновки по роботі.

ГРАФІК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Визначення актуальних напрямків досліджень	18.10.2024	
2	Розділ 2. Дослідження особливостей формування плазмових покриттів	08.11.2024	
3	Розділ 3. Підготовка поверхні деталі перед нанесенням плазмових покриттів	22.11.2024	
4	Загальні висновки	26.11.2024	
5	Оформлення структурних елементів МР	28.11.2024	
6	Ілюстративний матеріал до МР	29.11.2024	

Магістрант

(підпис)

ВЕРДИШ Д.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

МАГОПЕЦЬ С.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Метою дослідження було встановлення безпосереднього взаємозв'язку між дуговим розрядом розпилювача та просторовим положенням й формою струменя плазми за ним та спільного впливу цих факторів, за показником ефективності процесу напилення, на структуру покриття, що формується.

В першому розділі роботи «Визначення актуальних напрямків досліджень» визначені особливості організації та виробничої діяльності машинобудівного підприємства ТОВ «Ремсинтез»; виконаний порівняльний «SWOT-аналіз»; визначені актуальні напрямки досліджень, встановлена їх мета, визначені об'єкт й предмет, сформульовані задачі, які потребують подальшого вирішення.

При цьому, об'єктом дослідження виступає процес плазмового-дугового напилення під дією магнітного поля, а предметом - параметри формування плазмових покриттів під зовнішнім магнітним впливом із покращеними показниками міцності зчеплення, зниження пористості та підвищення ефективності використання матеріалу (КЕВМ).

Основними задачами, які необхідно вирішити визнано:

- встановлення причин зниження та оцінка шляхів підвищення КЕВМ;
- дослідження можливості застосування магнітного поля поперечної дії для керування просторовими параметрами газового потоку на виході із плазмового розпилювача та встановлення раціональних параметрів його роботи;
- дослідження зміни форми плями напилення в залежності від параметрів дії магнітного поля при застосуванні різних присадкових матеріалів;
- дослідження показників якості напилених покриттів при зміні структури та форми плями напилення;
- дослідження впливу попередньої підготовки поверхні деталі на міцність зчеплення напиленого покриття.

В другому розділі «Дослідження особливостей формування плазмових покриттів» розроблена фізична модель зміни просторового положення дуги та потоку плазми у плазмотроні під впливом зовнішнього магнітного поля (ЗМП) поперечної дії; оцінка впливу поперечного ЗМП на параметри потоку плазми та дослідження ефективності та якості процесу плазмового напилення покриттів при дії поперечного ЗМП.

В третьому розділі «Підготовка поверхні деталі перед нанесення плазмових покриттів» наведена методика та режими обробки поверхонь деталей перед напиленням й досліджено міцність зчеплення напиленого плазмового покриття із поверхнею деталі при різних способах попередньої підготовки поверхні.

Кваліфікаційна робота складається із пояснювальної записки обсягом 53 сторінки із 27 рисунками та 6 таблицями, яка містить завдання, реферат, зміст, вступ, 3 основні розділи, загальні висновки й перелік використаних джерел та 9 слайдів ілюстративного матеріалу загальним обсягом сторінок.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЗЕМ – зовнішній електромагніт

ЗМП – зовнішнє магнітне поле

КЕВМ – коефіцієнт ефективності використання матеріалу

НАН – національна академія наук

НВЦ – науково-виробничий центр

НДІ – науково-дослідний інститут

ТЗ – транспортний засіб

ЧПК – числове програмне керування

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	6
1. ВИЗНАЧЕННЯ АКТУАЛЬНИХ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1. Аналіз виробничого спрямування й ефективності виробничої діяльності підприємства	9
1.2. Обґрунтування актуальних напрямків досліджень, визначення їх мети та задач	13
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ	19
2.1. Лабораторне обладнання та загальна методика проведення досліджень	19
2.2. Розробка фізичної моделі зміни положення дуги та потоку плазми у плазмотроні під впливом ЗМП поперечної дії	22
2.3. Оцінка впливу поперечного ЗМП на параметри потоку плазми	29
2.4. Дослідження ефективності та якості процесу плазмового напилення покриттів при дії поперечного ЗМП	31
3. ПІДГОТОВКА ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ ПЕРЕД НАНЕСЕННЯМ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ	40
3.1. Методика та режими попередньої підготовки поверхні перед напиленням плазмового покриття	40
3.2. Дослідження міцності зчеплення напиленого покриття із поверхнею деталі при різних способах попередньої підготовки цієї поверхні	42
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	49
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52

ВСТУП

Сучасна автомобільна, дорожня й с.-г. техніка в експлуатації працює у надскладних швидкісних й навантажувальних режимах та повинна при цьому забезпечувати високу продуктивність та достатню надійність вузлів і механізмів. Надійність же, визначається рівнем зносостійкості й втомлювальної міцності матеріалів деталей, робочі поверхні яких працюють на підвищених до 120,0...140,0 м/с швидкостях тертя та при контактних тисках, що перевищують 220,0 кгс/мм².

Загальновідомим є те, що не зважаючи на всі передбачені під час проведених конструкторських та проектних робіт заходи, більшість деталей та механізмів машин під впливом сил тертя, діючих на них динамічних й температурних навантажень, спричинених як робочими процесами самих машин так й впливом навколишнього середовища – неминуче піддаються процесам зношування. Як наслідок – критично погіршуються умови роботи спряжень, з'являються додаткові негативні фактори, дія яких призводить спочатку до виникнення несправностей окремих деталей й механізмів, які перестають задовольняти нормативним вимогам, що до них висуваються, а потім й до втрати працездатного стану вузла, механізму та/або машини в цілому. Процеси зношування деталей машин, нажаль, виключити не можна; їх інтенсивність та наслідки також характеризуються відмінними ступенями нерівномірності для різних механізмів та пар тертя, що обумовлює й різні експлуатаційні терміни роботи агрегатів, навіть при своєчасному та у повному обсязі виконаному обсязі сервісних робіт.

Знос поверхонь деталей спричиняє порушення в роботі вузлів і механізмів машини, наслідком яких є зниження динамічних й швидкісних характеристик, підвищення обсягів витрат експлуатаційних матеріалів, погіршення економічних й екологічних параметрів, зниження рівня експлуатаційної надійності та безпекового аспекту її роботи. Як наслідок, подальше падіння рівня продуктивності, зменшення напрацювання, зниження якості виконання функціонального призначення, необхідність більш частого проведення сервісних й ремонтних впливів та витрати часу й коштів на їх реалізацію. Надмірний знос поверхонь деталей є основною причиною появи додаткових, не врахованих

динамічних навантажень, що безпосередньо впливає на аварійне зниження рівня міцності деталей, суттєво підвищує ймовірність виникнення несподіваних поломок та аварій.

В підтвердження сказаного, можна навести дані досліджень щодо погіршення характеристик однієї із найбільш відповідальних систем автомобіля – його двигуна, які свідчать, що при зношенні лише циліндро-поршневої групи ДВЗ, споживання ним палива підвищується на 25...40%, а моторної оливи – більш як у 2...3 рази.

Серед існуючих варіантів вирішення задачі відновлення працездатності вузлів, механізмів та систем машин (автомобілів, тракторів та іншої техніки) потрібно обирати найбільш раціональний, який характеризується меншими обсягами ремонтних дій при менших трудових й вартісних витратах. Найбільш простою, як за практичною реалізацією так й за часом перебування машини у ремонті, є методика, яка базується на реалізації принципу заміни зношених деталей новими. Разом з тим, її практичне застосування в більшості випадків має й суттєві недоліки та обмеження. До недоліків можна віднести, наприклад, підвищену вартість нових деталей, а обмеженнями виступають часові терміни доставки запасних частин їх виробниками та постачальниками.

Більш ефективним є застосування методики подальшого використання деталей за рахунок проведення відновлювальних операцій та максимально можливого використання закладеного в них, під час проектування та виробництва, ресурсу. В одиничному контексті, тобто для конкретного транспортного засобу, це забезпечить скорочення термінів перебування у ремонті та відновлення його працездатності із мінімальними грошовими витратами. Не менш важливим є й те, що відновлення деталей здатне не тільки повернути показники нормативного ресурсу, а й навіть підвищити їх. Натомість як ресурсні характеристики нових деталей, придбаних в якості запасних частин, не є прогнозованими та визначаються досконалістю та якістю їх виробництва, які останнім часом, нажаль, не можна назвати прийнятними. Офіційно оприлюднені дані свідчать, що відновлення працездатності зношених деталей потребує у 5...8 разів меншого виконання технологічних операцій у порівнянні із виготовленням аналогічних нових деталей.

В глобальному масштабі, застосування прогресивних сучасних технологій відновлення зношених деталей машин, забезпечує суттєву економію високоякісних матеріалів, різних видів енергії та трудових ресурсів, що забезпечує більш раціональне використання природних ресурсів й зменшує негативний вплив на довкілля.

Саме тому, розробка ресурсозберігаючих технологій відновлення зношених деталей, при дотриманні мінімальних економічно обґрунтованих термінів проведення ремонтних дій, є важливою державною задачею. Отже, дослідження спрямовані на визначення раціональних параметрів нанесення газотермічних покриттів при відновленні зношених поверхонь валів є беззаперечно актуальними та своєчасними.

Розділ 1.

ВИЗНАЧЕННЯ АКТУАЛЬНИХ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз виробничого спрямування й ефективності виробничої діяльності підприємства

Машинобудівне підприємство ТОВ «Ремсинтез» забезпечує повний цикл виробництва нової техніки та знарядь як сільськогосподарського так й транспортного призначення. Станом на 01.09.2024 р. підприємство володіє статутним капіталом у розмірі близько 3 млн. грн. Керує підприємством Самілик Олександр Миколайович, випускник кафедри «Експлуатація та ремонт машин» ЦНТУ, який приймає активну участь у підготовці фахівців спеціальностей 274 «Автомобільний транспорт» та 208 «Технічний сервіс в АПК» в якості зовнішнього стейкхолдера. Офіційно ТОВ «Ремсинтез» зареєстровано 01.12.2000 р. у м. Кропивницький за Перша виставкова вулиця, буд. 27-Б.

За відкритою публічною інформацією наведеною у реєстрі підприємств України, визначеною у його статуті та оприлюдненою на офіційному сайті підприємства, основним видом його виробничої діяльності за КВЕД є виробництво машин і устаткування для сільського та лісового господарства та інші види діяльності з [1]:

- «Оптовій торгівлі зерном, необробленим тютюном, насінням і кормами для тварин (46.21)»;
- «Оптовій торгівлі машинами й устаткуванням (46.61)»;
- «Оптова торгівля верстатами (46.62) та ін. види діяльності» [1].

На сьогодні, ТОВ «Ремсинтез» є сучасним машинобудівним підприємством, яке динамічно розвивається й має необхідні виробничі потужності для організації виробництва різноманітної сучасної техніки, яка має високий рівень конкурентноздатності завдяки: сучасному технологічному обладнанню та технологіям, висококваліфікованому виробничому персоналу, наявності власного конструкторського підрозділу, внутрішньому контролю якості продукції у відповідності до міжнародних стандартів ISO 9000/9001/9004/19011:2000, безкоштовній доставці замовникам продукції в межах України та впровадженій

методиці обов'язкового технічного супроводу кожної одиниці реалізованої продукції власного виготовлення й налагодженому ефективному зворотному зв'язку із клієнтами. Функціонування такої структури дозволяє підприємству максимально швидко реагувати на потреби ринку, виробляти нові види техніки та впроваджувати нові технології; в найкоротші терміни усувати виявлені під час експлуатації виробів недоліки та забезпечувати підвищення показників надійності виробленої техніки, під час проектування якої підприємство застосовує концепцію проведення модернізації та вдосконалення без підвищення вартості, закладаючи в ціну виробів мінімальний відсоток рентабельності.

Високий рівень організації діяльності та провадження виробництва машин та знарядь підтверджено багаторазовим у 2016-2020 рр. визнанням підприємства переможцем у номінації «Кращий вітчизняний виробник сільськогосподарської техніки», що надало компанії популярності, як в Україні так й за її межами та «дозволило залучити до співпраці та партнерства відомі вітчизняні машинобудівні та агропромислові компанії, більшість з яких сьогодні є постійними клієнтами й друзями [1]». Головне гасло підприємства звучить так: «Наша компанія – налагоджений механізм із закупки, продажу, поставки й організації будь-якої роботи із товаром, який вибирає наш клієнт; ми виконуємо нашу роботу якісно, швидко й зручно для Вас» [1].

Підприємство ТОВ «Ремсинтез» має власні виробничі потужності площею близько 5 тис. м², розташованих у промисловій зоні м. Кропивницький за адресою: вул. Мурманська, 43-Б). Виробничий процес підприємства забезпечується штатним складом персоналу чисельністю близько 50 осіб із можливістю його швидкого збільшення до 100 осіб - при необхідності виконання підвищених виробничих обсягів.

До структури підприємства входять так структурні підрозділи як: конструкторське бюро, дільниця механічної обробки із сучасним верстатним обладнанням із ЧПК для виконання токарних, шліфувальних, полірувальних, розточувальних, хонінгувальних та фрезерних операцій (рис. 1.1), мийно-очисна та малярна дільниці; зварювальна дільниця, складальна дільниця (рис. 1.2), випробувальна дільниця та ін. підрозділи.

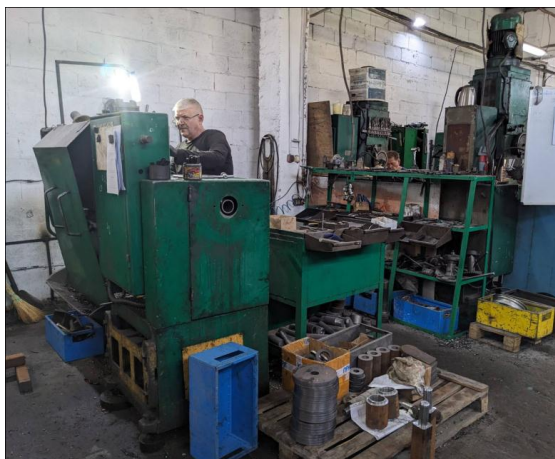


Рисунок 1.1 – Механічна дільниця



Рисунок 1.2 – Зварювальна дільниця



Рисунок 1.3 – Очисна й малярна дільниці

Проведений під час проходження дослідної практики на підприємстві аналіз ефективності його роботи за останні роки (з 2021 по 2024 роки), дозволив оцінити й порівняти сильні й слабкі сторони виробничої діяльності, виявити та згрупувати потенційні можливості та загрози, що дозволило сформулювати необхідні та перспективні напрямки змін й реорганізації виробничого потенціалу підприємства у найближчій перспективі (рис. 1.4) [3].

СЛАБКІ СТОРОНИ 1. Обмежені наявні виробничі потужності без можливості їх розширення. 2. Коливання обсягів виробленої продукції протягом року. 3. Змінна чисельність виробничого персоналу визначена наявними обсягами замовлень на виробництво продукції. 4. Відсутність в структурі достатньої кількості дослідницьких лабораторій із проведення наукових досліджень щодо показників надійності та безвідмовності продукції. 5. Реалізація продукції в основному для замовників в межах України.	СИЛЬНІ СТОРОНИ 1. Повний виробничий цикл «проекткування – виготовлення – реалізація продукції». 2. Сучасне технологічне обладнання. 3. Висококваліфікований персонал. 4. Власне конструкторське бюро. 5. Постійна модернізація та удосконалення продукції. 6. Нижча за конкурентів вартість продукції за рахунок мінімального відсотку рентабельності закладеного у кінцеву ціну. 7. Внутрішній контроль якості на рівні світових стандартів. 8. Безкоштовна доставка продукції. 9. Гарантія на всю вироблену продукцію. 10. Відкритість до клієнтів – можливість безпосередньо ознайомитися із процесом виробництва та послікуватись із конструкторами. 11. Зручність розташування виробничих площ.
ЗАГРОЗИ 1. Недостатні та нестабільні обсяги щорічних контрактів. 2. Високі ризики втрати та/або зміни кадрового потенціалу за рахунок наявних в країні міграційних процесів. 3. Висока конкуренція на ринку продукції в регіоні, насамперед від відомого виробника аналогічної продукції АТ «Ельворті-Груп» (м. Кропивницький). 4. Можлива втрата замовлень з-за високого рівня завантаженості виробництва. 5. Форсмажорні обставини.	МОЖЛИВОСТІ 1. Ідентифікація існуючих проблем та напрямів їх вирішення. 2. Розширення обсягів проведення проектних та конструкторських робіт, як для власних потреб, так і на замовлення інших підприємств та організацій. 3. Розширення номенклатури виробленої продукції за рахунок виробництва нових видів і типів машин та знарядь. 4. Організація нових структурних підрозділів для виконання сервісних робіт, із розміщенням як на основних виробничих потужностях підприємства, так і на віддаленні – регіональні сервісні центри. 5. Достатній досвід роботи на ринку для формування взаємовідносин із дилерами відомих світових виробників.

Рисунок 1.4. – Загальна оцінка ефективності функціонування ТОВ «Ремсинтез» (м. Кропивницький) в період 2021-2024 рр.

Аналізуючи представлену на рис. 1.4 інформацію SWOT-АНАЛІЗУ можна відзначити, що «Сильні сторони» й «Можливості» підприємства превалюють над існуючими «Слабкими сторонами» та «Загрозами», що позитивним чином характеризує виробничу діяльність підприємства у наступні 3 роки. Найбільш потенційно перспективним з точки зору практичного впровадження можна відзначити такий напрямок блоку «Можливості» як «Організація нових структурних підрозділів для виконання сервісних робіт...» [2].

1.2 Обґрунтування актуальних напрямків досліджень, визначення їх мети та задач

Намагаючись підтримати високий рівень якості власної продукції ТОВ «Ремсинтез» значну увагу приділяє аналізу як позитивних так й негативних відгуків та проблем, що виникли під час експлуатації машин. Під час проходження дослідницької практики на підприємстві було виявлено, що існує проблема підвищеного гідроабразивного та абразивного зношення опорних шийок деталей типу «вал» (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Зношені поверхні валів с.г. та іншої техніки

На поточний час підприємство, під час ремонту механізмів із зношеними валами застосовує технологію заміни їх новими. При цьому, замінені деталі вибраковуюються й передаються до накопичувального фонду металевих відходів виробництва, що підлягають наступній передачі до металобрухту [2]. Така

ситуація є критично не вигідною, так як неекономно використовується фонд прокатних заготовок й відповідно збільшується рівень збитковості виробництва даних деталей. Усунення проблеми, що виникла можлива шляхом впровадження на підприємстві технології відновлення означених дефектів валів, так як спеціалізованого ремонтного підприємства в регіоні на поточний час не має.

Аналіз існуючих способів компенсації зношених шарів металу на поверхнях деталей типу «вал» показав, що вибір раціонального способу залежить як від форми та розмірів зношеної поверхні, так й від обсягу металу, який потрібно нанести на поверхні [3]. Так як величини зносів на поверхнях валів можуть досягати до 1,0 мм, а для усунення еліпсності та придання поверхні циліндричності необхідно зняти з цих поверхонь додаткові обсяги металу, використання таких способів як, наприклад, електрохімічні нанесення покриттів, застосовувати не можна. Більш ефективними є способи відновлення наплавленням (під шаром флюсу, у середовищі захисних газів, вібродугове, плазмове, електроімпульсне, індукційне та ін.), припікання порошків, наварювання дротів або стрічок та нанесення порошкових покриттів металізацією (напилення) [4].

В таблиці 1.1 наведені характеристики найбільш поширених способів відновлення та зміцнення зношених поверхонь деталей типу «вал».

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики деяких методів, які найбільш часто використовуються для зміцнення й відновлення деталей типу «вал»

Назва способу	Характеристика способу		
	ступінь розчинності металу деталі, %	рівень зчеплення покриття із поверхнею деталі	можливий рівень автоматизації процесу
Газополуменеве напилювання із фінішним плавленням	1,1...5,0	визначається рівнем навичок робітника	відсутня
Електродугове наплавлення електродом, що плавиться у середовищі аргону	21,0...28,0	якісне	напівавтоматичний
Електродугове наплавлення електродом, що не плавиться у середовищі аргону	5,2...9,6	якісне	напівавтоматичний
Плазмове напилення	2,1...4,8	якісне	автоматичний

Враховуючи технічні можливості підприємства щодо можливості реалізації того чи іншого способу, після оцінки переваг та недоліків кожного з

них, найбільш раціональним способом було визнано напилення зносостійких покриттів, яке може «застосовуватись практично у всіх галузях промисловості: в той же час розробка обладнання та технологічного процесу базуються на основних закономірностях використання різних видів енергії, теплообміну та газодинаміки [3]».

«Напилення покриттів на поверхню деталей з метою надання їм необхідних властивостей - зносостійкості, корозійної стійкості та інших, або з метою їх відновлення є економічно ефективним засобом збереження енергетичних та матеріальних ресурсів [4]». Найбільш поширеними технологіями напилення газотермічних покриттів є газополуменеве, електродугове та плазмове напилення [3, 4, 5].

Оцінюючи наведені вище технології газотермічного напилення, в якості раціонального для підприємства було обрано саме плазмовий, як такий, що є найбільш сучасним, ефективним й перспективним з точки зору вдосконалення. Даний спосіб забезпечує можливість отримання на поверхнях деталей покриттів із зносостійких й твердих металів, карбідів та оксидів металів та серед багатьох переваг має й один обмежуючий недолік – підвищену вартість технологічного обладнання [3, 4, 5], який відсутній у менш вартісної електродугової металізації. Використання останньої було визнано неефективним з огляду на притаманні їй недоліки: широкий розкид розпилених часточок за фракційним складом, незадовільна міцність зчеплення покриття з основою та його щільність, значне окислення частинок металу та вигорання легуючих елементів [3; 4].

До основних загальновизнаних переваг плазмового нанесення покриттів, який ґрунтується на здатності газів переходити за визначених умов у стан плазми, прийнято відносити [4]:

- мінімальну зону поверхні деталі, що піддається термічній дії (впливу);
- можливість адаптивного регулювання енергетичного впливу, як на основний метал деталі, так й на матеріал, що формує покриття;
- високу міцність й щільність матеріалу сформованого покриття;
- мінімізацію можливих деформацій деталі;
- високий рівень продуктивності процесу;

- можливість автоматизації процесу формування покриттів.

«Оптимальний вибір технологічних режимів процесу плазмового наплавлення забезпечує мінімальне перемішування наплавленого матеріалу із основним металом, практично, з нульовою глибиною проплавлення (що дозволяє при одношаровому наплавленні забезпечити заданий склад навіть тонкого шару покриття), а також мінімальну окисленість наплавленого матеріалу за рахунок спеціального інертного або відбудовного захисного середовища [5]».

Зроблений вибір на користь саме плазмового нанесення покриттів враховував й підвищений рівень експлуатаційного ресурсу відновлених цією технологією деталей і спряжень, отриманий за рахунок високої якості наплавленого металу, його однорідної та сприятливої структури, сформованої специфічними умовами кристалізації металу покриття [4, 5].

Спосіб унікальний тим, що дозволяє здійснювати в широкому діапазоні регулювання взаємозв'язку теплової потужності дуги та кількості й температури присадкового матеріалу, що подається до зварювальної ванни. Результатом є можливість забезпечення мінімального ступеня проплавлення основного металу деталі, а отже й уникнення таких негативних наслідків як втрата її геометричної форми в процесі відновлення [3, 5]. Максимальна ефективність плазмового наплавлення забезпечується при автоматизації процесу та залежить від джерела живлення, присадкового матеріалу, що формує покриття, й встановлених режимів наплавлення [5]. Реалізація даного способу на підприємстві дозволить наносити на поверхні валів покриття із властивостями, що забезпечують ударну, корозійну, теплову та стійкість до зносу, за рахунок використання таких матеріалів як: композиційних порошків на основі *Fe* (в тому числі й нержавіючих сталей), кобальту (*Co*), нікелю (*Ni*) та ін. [3; 4; 5].

Важливою перевагою плазмового нанесення покриттів, крім підвищення якості, надійності та довговічності деталей після наплавлення, є й покращені умови праці виробничих робітників. Аналіз досвіду промислового використання цієї технології показав, що, наприклад, застосування плазмового напилення порошковими матеріалами дозволяє (у порівнянні із ручним наплавленням) на 25...45% підвищити рівень продуктивності праці, на 45...65% скоротити витрату матеріалів та майже на 50% - зменшити витрати енергії [5].

Враховуючи те, що в нашій країні на поточний час економіка знаходиться у вкрай важкому стані, що обумовлено триваючою агресією та дією воєнного стану, а вартість енергоносіїв та металів поступово але постійно зростає, підвищення ефективності проведення процесу плазмового нанесення покриттів є доволі актуальною задачею. Характеризуючи ефективність безпосередньо самого процесу плазмового нанесення покриттів, то вона визначається трьома основними показниками, а саме: якістю покриття, продуктивністю процесу та найбільш значимою серед усіх величиною – коефіцієнтом, що визначає ефективність використання матеріалу ($KEBM$) [5].

Низькі значення цього показника в діапазоні $KEBM = 60..80\%$ плазмовому способі, свідчать про неефективне використання матеріалів, що напильються, за рахунок нерівномірності температурних режимів нагріву та наявного значного градієнту прискорень рухомих часточок присадкового матеріалу, що формують високотемпературний газовий струмінь. Нажаль, наявне на поточний час промислове обладнання для плазмового нанесення покриттів, здатне забезпечити керування процесами нагріву та прискорення присадкового матеріалу лише за рахунок зміни параметрів та режимів, впливаючи тільки на загальний рівень енергетичної компоненти процесу; натомість, як просторові умови нагрівання й прискорення сукупності частинок матеріалу, що напильються залишаються без змін.

Здійснювати вплив на просторову форму струменя плазми, що формується на виході із плазмового розпилювача, можна при використанні ультразвукових або магнітних полів, які діють у каналі генератора плазми на високотемпературний газовий струмінь, що є продуктом взаємної дії електричної дуги з плазмоутворюючим газом.

Разом з тим, на поточний час, недостатньо дослідженим залишається процес керування формою дуги у плазмотроні при застосуванні керуючого змінного магнітного поля, що визначає мету проведення досліджень - встановлення безпосереднього взаємозв'язку між дуговим розрядом розпилювача та просторовим положенням й формою струменя плазми за ним та спільного впливу цих факторів, за показником ефективності процесу напильнення, на

структуру покриття, що формується.

Отже, в якості об'єкту дослідження було прийнято процес плазмового-дугового напилення під дією магнітного поля.

Предметом дослідження є параметри формування плазмових покриттів під зовнішнім магнітним впливом із покращеними показниками міцності зчеплення, зниження пористості та підвищення $KEBM$.

Для досягнення поставленої мети в роботі потрібно вирішити наступні задачі:

- встановити причини зниження та запропонувати шляхи підвищення величини $KEBM$;
- дослідити можливість застосування магнітного поля поперечної дії для керування просторовими параметрами газового потоку на виході із плазмового розпилювача та встановити раціональні параметри його роботи;
- дослідити зміну форми плями напилення в залежності від параметрів дії магнітного поля при застосуванні різних присадкових матеріалів;
- дослідити показники якості напилених покриттів при зміні структури та форми плями напилення;
- дослідити вплив попередньої підготовки поверхні деталі на міцності зчеплення напиленого покриття.

Розділ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ

2.1 Лабораторне обладнання та загальна методика проведення досліджень

Для формування плазмових покриттів ТОВ «Ремсинтез», після проведеного ґрунтовного аналізу можливих варіантів, було придбано вітчизняну установку призначену для напилення покриттів «PLAZER 30-PL-W» (рис. 2.1) виробництва ТОВ «Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР» (м. Київ), яке входить до складу корпорації «УКРСПЕЦТЕХНОЛОГІЇ». «Основним видом діяльності компанії, заснованої у 2005 р. в якості виробника нового обладнання під торговою маркою «PLAZER», є розробка та виробництво обладнання для напилення покриттів, переплавлення, обробки, різання, зварювання та виробництва нових матеріалів [8]». На поточний час ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» є лідером з виробництва даної продукції на ринку України та «свою практичну діяльність реалізує при активній співпраці із профільними Інститутами НАН України, провідними технічними університетами, НДІ, конструкторськими бюро машинобудівних підприємств та науково-виробничими підприємствами, що забезпечує розробку й промислове впровадження інноваційних плазмових та електродугових технологій та обладнання для їх реалізації [8]».



Рисунок 2.1 – Установка для напилення покриттів «PLAZER 30-PL-W»

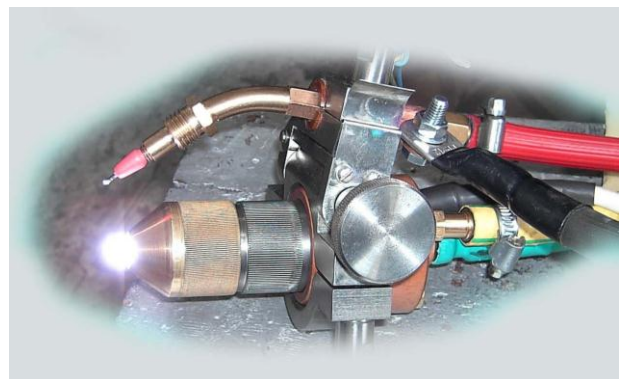


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд плазмотрону

«Установка (система) «PLAZER 30-PL-W» забезпечує напилення зносостійких, корозійностійких й спеціальних покриттів, а також відновлення зношених деталей ТЗ та іншої техніки шляхом напилення струмопровідних матеріалів у вигляді порошку та/або дротів діаметрами 1,6...1,8 мм, формуючи напилені покриття товщиною 0,05...5,0 мм (й більше) та використовуючи в якості робочих газів стиснене повітря й аргон (Ar) [8]».

Однією із технічних особливостей даної установки є реалізація «процесу плазмодугового напилення дроту у аргонній дузі із додатковим інтенсивним обдуванням - дуга горить між вольфрамовим катодом плазмотрону (див. рис. 2.2), що продувається із низькою швидкістю Ar та основним присадковим дротом (анодом), що подається секцією бінарного сопла плазмотрона [8]».

Основні технічні характеристики установки «PLAZER 30-PL-W» представлені у таблиці 2.1.

Характеристика	Величина
Споживана потужність, кВт (не більше)	30,0
Мережа живлення змінного трифазного струму напругою 50 Гц, В	380^{+19}_{-38}
Напруга холостого ходу, В	160,0
Діапазон регулювання робочого струму, А	100...250
Діапазон регулювання робочої напруги, В	30...80
Максимальний коефіцієнт навантаження, DF %	100,0
Витрата повітря при тиску 0,6 МПа, нм ³ /год	50,0
Витрата аргону при тиску 0,1 МПа, нм ³ /год	2,0
Швидкість подачі дроту, м/хв	5,0...15,0
Охолодження плазмотрону	повітряне
Термін служби сопла та катоду плазмотрона, робочі год. (не менше)	100,0
Габаритні розміри, мм: - джерело живлення - шафа керування	501×478×503 605×605×1600

До конструктивного складу установки «PLAZER 30-PL-W» входять такі її підсистеми як: «шафа керування із спеціалізованим інверторним джерелом живлення, вимірювальною, пусковою й контрольно-сигнальною апаратурою; плазмотрон із механізмом регулюванням; пристрій подачі дроту; пакет кабелів і шлангів й блок запалювання дуги [8]». «На передній панелі шафи керування розміщені: спеціалізований щит керування інверторним джерелом живлення, апаратура вимірювання та контролю тиску та робочих газів, цифровий індикатор обертання (лічильника) електроприводу, пристрої керування режимами роботи

агрегату, схеми розпалу плазмотрона, контури підготовки повітря та аргону та блок керування приводом подачі дротів [8]».

Відмінними особливостями процесу напилення зносостійких покриттів на установці «PLAZER 30-PL-W», що забезпечує плазмово-дугове напилення електропровідним анодом є:

- «- розплавлення матеріалу дроту у захисній атмосфері Ar ;
- розщеплення розплавленої речовини та прискорення дисперсних частинок за допомогою аргонної плазми;
- стиснення й прискорення плазмового струменя та запобігання окисленню матеріалу, що випаровується, надзвуковим потоком повітря, що виходить із кільцевого зазору між соплами плазмотрону [8]».

Перевагами установки при формуванні захисних покриттів та/або відновленні зношених поверхонь деталей є те, що [8]:

- «- процес напилення не знижує опору втоми та інших характеристик міцності деталей (у порівнянні із процесом наплавлення) забезпечуючи нагрів деталі лише до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- відсутність деформаційних проявів деталі, що оброблюється;
- висока стабільність процесу напилення та отриманих властивостей покриття за рахунок збільшеного терміну служби сопла, що формує плазмову дугу, й катодного агрегату (понад 100 год. продуктивного часу);
- можливість напилення різних типів покриттів із високолегованих сталей (в т.ч. й композиційних (порошкових) дротів, що містять зміцнюючі композиції (карбіди, бориди, оксиди та ін.)), що дозволяє здійснювати регулювання показників твердості, зносостійкості, корозійної стійкості та ін. поверхонь деталей;
- забезпечується більш висока щільність покриттів (пористість менше за $0,5\ldots 2,5\%$) при максимальному когезійному опорі основи до $50,0\text{ МПа}$ (при нормальному відриві), когезійна міцність та унеможливорюється вигорання легуючих елементів;
- установка характеризується простотою у експлуатації й не вимагає високої кваліфікації виробничого персоналу;
- відновлення зношених поверхонь дозволяє отримувати деталі термін

роботи яких перевищує термін служби нових деталей при забезпеченні 10..30% зниження вартості відновлених деталей (у порівнянні із собівартістю нових) [8]».

Зносостійкість напилених поверхонь оцінювали їх випробуваннями ударно-абразивним методом зношування у відповідності до стандартної методики. Для вимірювання діапазону 0...100 мТл зміни величини магнітної індукції, що створювалася електромагнітом, застосовували вимірювач марки 43205 із максимальною похибкою вимірювання до 0,5%. Величину *KEBM* визначали зважуванням на лабораторних вагах моделі ВЛТ-1. Показники пористості сформованих покриттів оцінювалися за стандартною методикою гідростатичного зважування. Випробування деталей на міцність зчеплення нанесених покриттів здійснювали за методикою відриву конусного індикатора при оцінці додатковим пристроєм повздовжніх локальних значень показників міцності зчеплення покриттів із основою. Зміни у структурі покриттів оцінювалися металографічним аналізом за допомогою оптичного мікроскопу МИМ-8М, натомість як оцінку мікротвердості покриттів проводили із використанням мікротвердоміру ПМТ-3. Прилад ЛКИ-3 та використання зважування на лабораторних вагах ВЛТ-1 забезпечували випробування нанесених покриттів на стійкість до абразивного зношування.

2.2 Розробка фізичної моделі зміни положення дуги та потоку плазми у плазмотроні під впливом ЗМП поперечної дії

У відповідності до запропонованого способу керування положенням електричної дуги у плазмовому розпилювачі під дією магнітного поля, яке повинне змінювати просторове положення струменя плазми, що формується в межах дугового каналу плазмотрону, необхідно виконати комплекс досліджень щодо особливостей формування параметрів електричної дуги в розпилювачі як під дією зовнішнього магнітного поля (ЗМП) так й без такої дії.

Отримані результати (рис. 2.3) показали зміну середнього значення довжини дуги l у розширеному діапазоні 24...30 мм, яка була викликана зміною параметрів процесу наплення при застосуванні повітря в якості плазмоутворювального й транспортуючого газу та підтриманні значення $I = 200 \text{ А}$ струму дуги та діапазону зміни індукції магнітного поля $(35...54) \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$. Слід відзначити, що додавання до

транспортуючого повітря певної кількості C_nH_m -компонента (пропан-бутану) забезпечує зміну умов шунтування й змінює значення середньої довжини дуги. Дослідження показали, що використання суміші повітря й пропан-бутану із об'ємною часткою останнього у 3%, забезпечує зростання середнього значення довжини дуги l в інтервалі 30...37 мм.

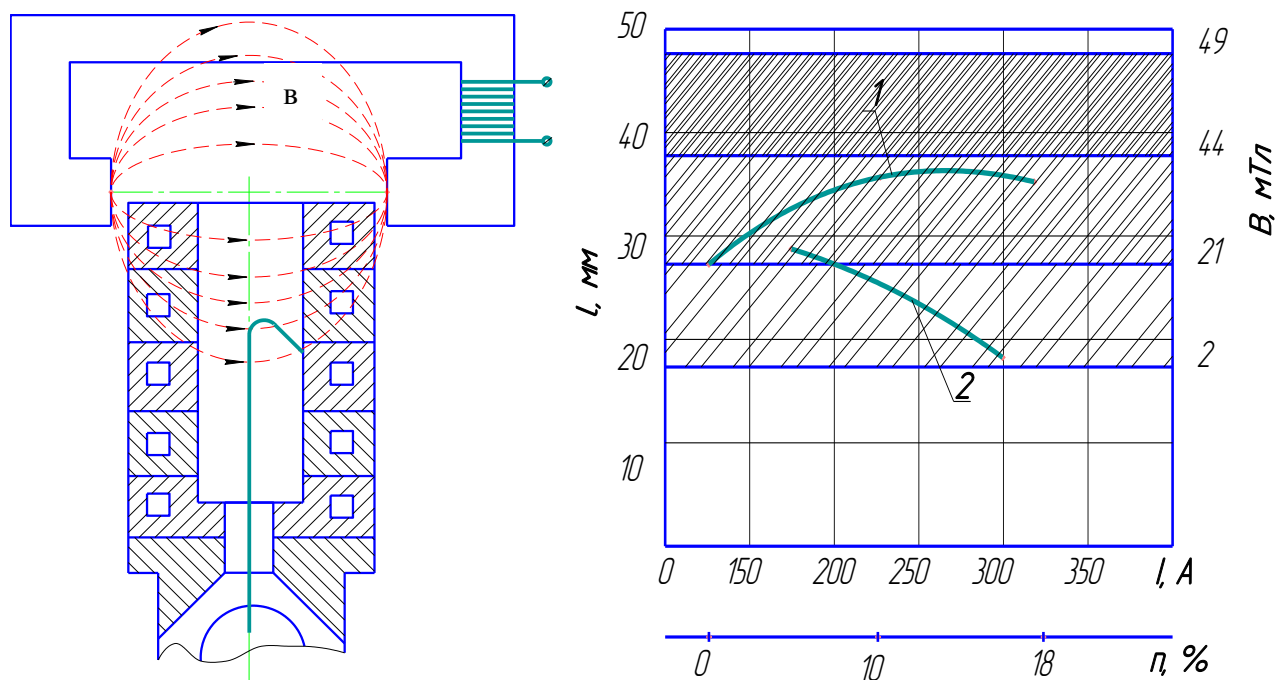


Рисунок 2.3 – Динаміка зміни довжини дуги (l) від концентрації C_nH_m -компонента (поз. 1) та струму дуги I (поз. 2)

Характеризуючи отримані результати, наведені на рис. 2.3, можна стверджувати, що область шунтування й частина стовпа дуги у плазмотроні із газодинамічною стабілізацією довжини дуги, формується при достатньо високих значеннях величин магнітної індукції ЗМП поперечної дії $B = (5...50) \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ в межах всього дослідженого діапазону струмів $I = 50...300 \text{ А}$.

Виконаними дослідженнями встановлено, що значення середнього інтегрального показника довжини дуги головним чином залежить від частки C_nH_m -компоненти у вихідній плазмоутворюючій суміші й збільшується при переході від використання повітря на його збагачені C_nH_m -суміші. Так, максимальне значення величини струму I зміщується на 2...3 калібри границі отвору вихідного каналу плазмотрону й утворюється на рівні середини полюсу керуючого зовнішнього електромагніту (ЗЕМ), вже при роботі на суміші із коефіцієнтом витрати окислювача $\alpha = 0,6$.

Певні корективи у розташуванні вихідної ділянки дуги при дії поперечної складової магнітного поля, визначаються й наявним ефектом закручування газу на виході із плазмотрону, який може бути використаний для фіксації форми й розмірів катодної плями й стабілізації положення дуги по відношенню до осі дугового каналу.

Переміщення площини, в якій розташовується пляма дуги під дією поперечної складової ЗМП, у напрямку закручування плазмоутворюючого газу на $30...75^\circ$ відносно напрямку поперечних осей каналу формування дуги, відбувається при зменшенні параметра кручення k , яким встановлюється співвідношення між осьовою й тангенційною складовими швидкості газового потоку в діапазоні від 2,2 до 0,31.

Дослідження показали, що зміна кута β - відхилення плазмоутворюючого струменя повітря (рис. 2.4 та рис. 2.5) із досягненням ним максимальних значень $\beta = 10...12^\circ$ досягається завдяки зміні величини B зовнішнього електромагніта в діапазоні $B = (20...80) \times 10^{-3} \text{ Тл}$ при величині струму дуги плазмотрона $I_\delta = 130...200 \text{ А}$ та тиску плазмоутворюючого газу $P_{n_2} = 0,3...0,5 \text{ МПа}$.

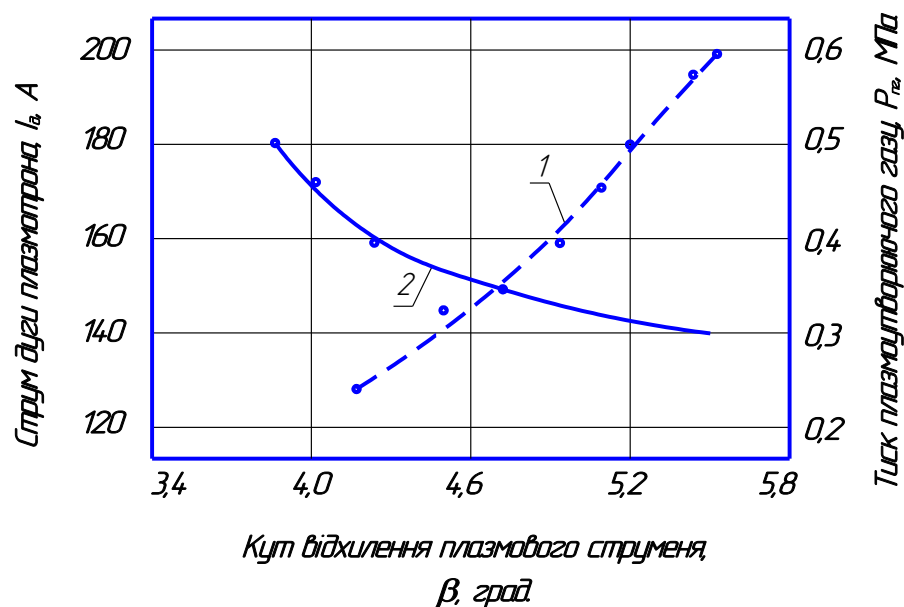


Рисунок 2.4 – Залежність зміни кута відхилення плазмового струменя (β) при $B = 79 \times 10^{-3} \text{ Тл}$ в робочому зазорі ЗЕМ від:

1 – струму дуги (I_δ) плазмотрону при роботі із тиском плазмоутворюючого газу $P_{n_2} = 0,3 \text{ МПа}$; 2 – тиску плазмоутворюючого газу (P_{n_2}) при значенню струму дуги плазмотрону $I_\delta = 200 \text{ А}$.

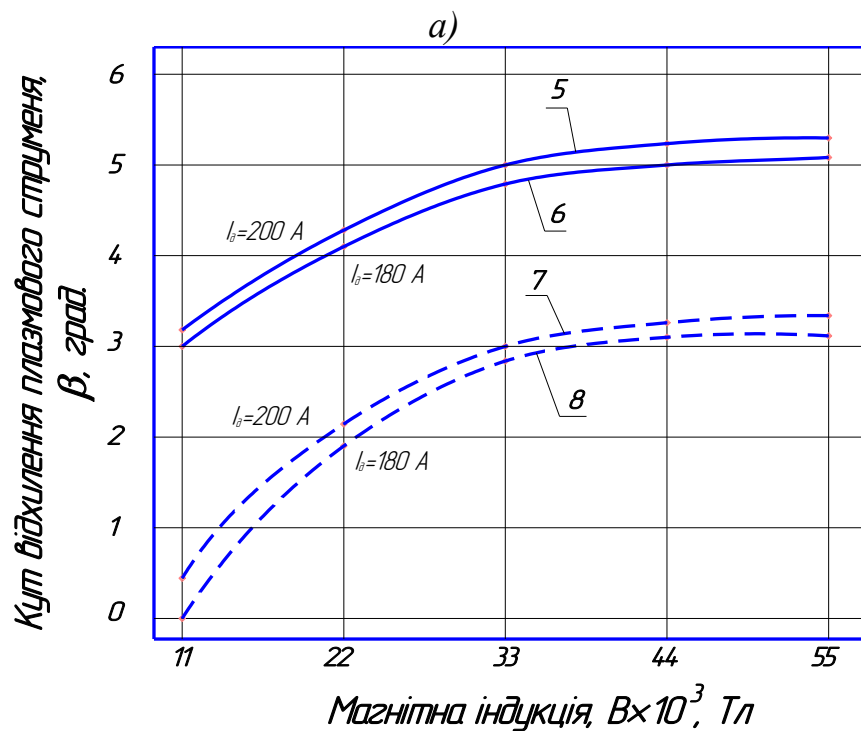
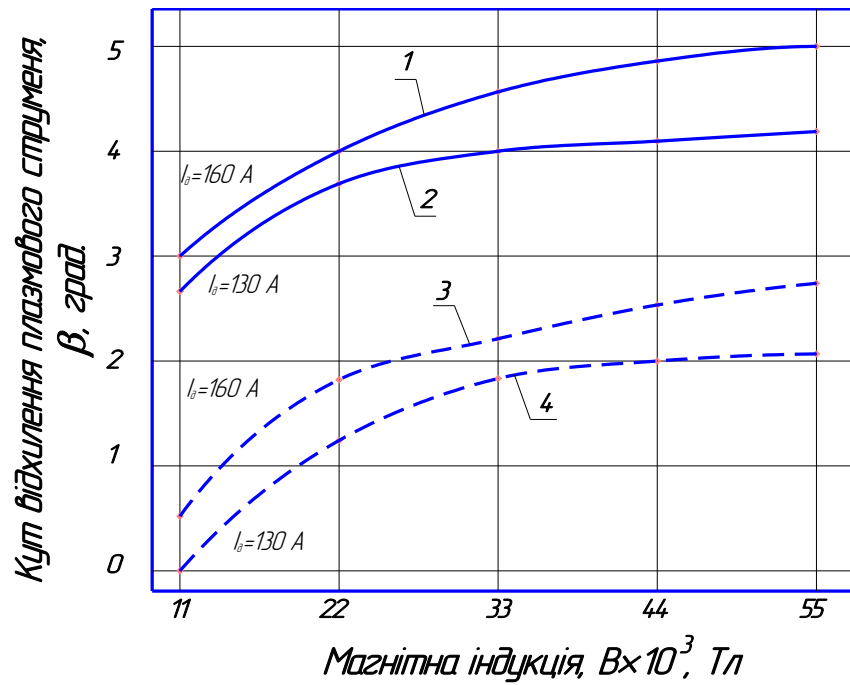


Рисунок 2.5 – Залежності зміни кута β відхилення плазмового газового струменя від величини магнітної індукції B робочого зазору ЗЕМ (при тиску плазмоутворюючого газу 0,3 МПа)

Аналіз наведених графічних залежностей дозволяє стверджувати, що величина кута відхилення плазмового струменя зростає пропорційно збільшенню у робочому зазорі електромагніту величини магнітної індукції B (див. рис. 2.5), струму I дуги плазмотрона (крива 1, рис. 2.4.), а із підвищенням тиску газу $P_{пг}$ - навпаки зменшується (крива 2, рис. 2.4.).

Результати проведених досліджень (рис. 2.6) щодо зміни типу плазмоутворюючого газу із повітря на його суміші із C_nH_m -компонентою (наприклад, пропан-бутаном) майже не змінює характер залежності кута відхилення плазмового струменя β_s від параметрів та режимів роботи плазмотрону.

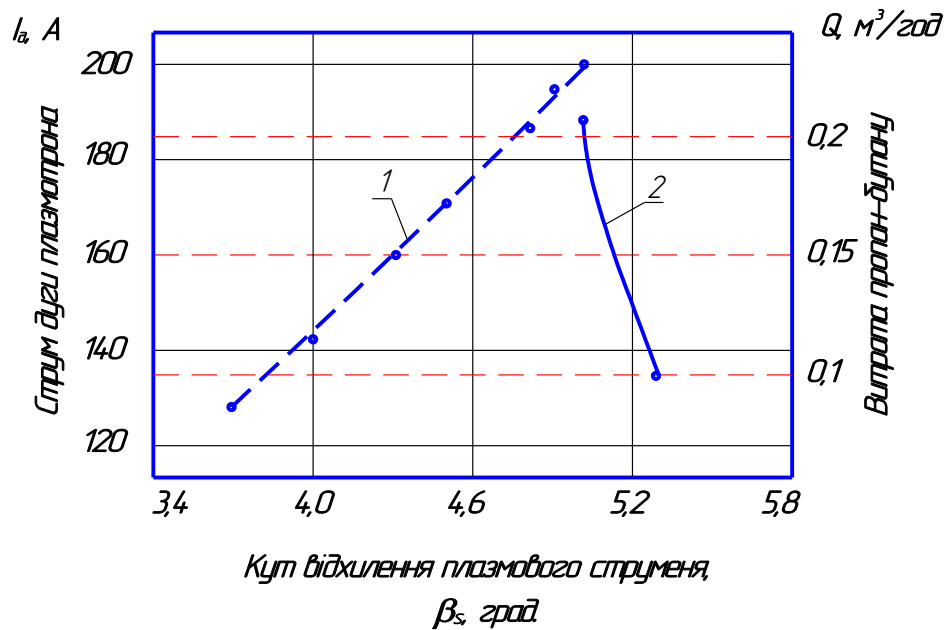


Рисунок 2.6 - Зміна кута β_s відхилення плазмового струменя суміші повітря із C_nH_m -газом від:

1 - струму дуги плазмотрона (I_δ) (при тиску $P_{ne} = 0,3 \text{ МПа}$ та витраті C_nH_m -газу $Q = 0,1 \text{ м}^3/\text{год}$); 2 – витрати пропан-бутану Q (при $I_\delta = 200 \text{ А}$ дуги та $B = 50 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$).

Подальші дослідження були спрямовані на розробку фізичної моделі впливу ЗМП поперечної дії на зміну положення електричної дуги та потоку плазми з низькими температурними показниками у просторі (рис. 2.7). Дослідженнями встановлено, що при роботі плазмотрону та активації ЗМП поперечної дії, в результаті взаємодії магнітного поля і струму дуги виникає сила Ампера $\vec{F}_A$, яка зумовлює початок зміщення частини факелу електричної дуги у поперечному до напрямку дії магнітної індукції зовнішнього магнітного поля напрямку (рис. 2.7 а).

При подальшому переміщенні факелу дуги із центральної частини вихідного каналу, яка узгоджується із центром вихрового потоку, дуга піддається впливу додаткових сил, що спричинені наявністю різниці тисків у поперечному перерізі дугового каналу.

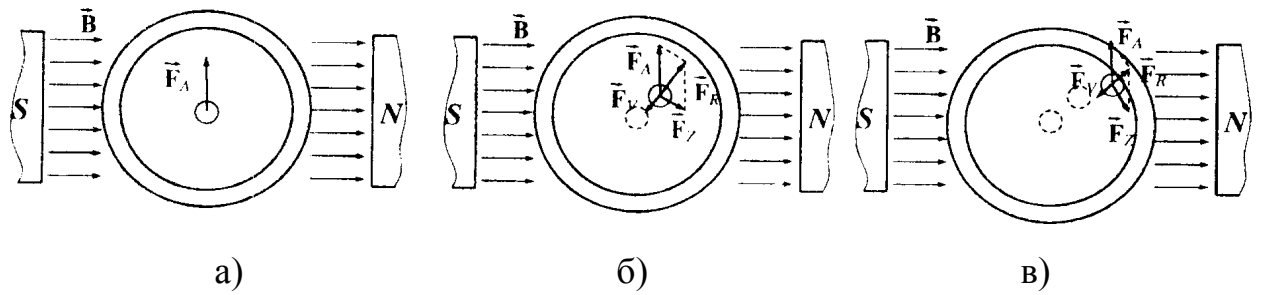


Рисунок 2.7 – Фізична модель дії сил на електричну дугу у плазмотроні під впливом постійно діючого поперечного ЗМП:

а – початкове положення; б – проміжна стадія; в – кінцева положення

До цих додаткових сил відносяться насамперед: сила $\vec{F}_v$, яка виникає в результаті появи перепаду тисків, що під час стабілізації дуги вихровим потоком діють від периферійних зон каналу плазмотрону до його центру та аеродинамічна сила $\vec{F}_z$, яка спочатку викликана дією тангенційної складової вектора швидкості плазмоутворювального газу, а потім - й високотемпературного газового потоку.

В подальшому, частина факелу дуги, що має взаємодію із магнітним полем, починає рухатися у напрямку результуючої $\vec{F}_R$ сил $\vec{F}_A$ та $\vec{F}_z$ (див. рис. 2.7 б). Рух факелу дуги продовжується до того часового моменту, коли результуюча сила $\vec{F}_R$ компенсується силою $\vec{F}_v$, що спрямовує дугу до центру каналу плазмотрону; після чого рух факелу дуги зупиняється й її положення у дуговому каналі надалі залишається незмінним (див. рис. 2.7 в).

При скороченні відстані до стінок вихідного електроду та появи ефекту шунтування дуги в цій зоні, відбувається стабілізація частини дуги, що максимально наближена до центрального електроду у дуговому каналі. Дана стабілізація ділянки формування дугового розряду забезпечує підвищення характеристик стабільності плазмового факелу, незважаючи навіть на ймовірне незначне погіршенні ресурсу бокового електроду.

Просторове положення початкової ділянки факелу дуги, як й зміна зони формування анодної плями, щодо повздовжньої осі каналу, формується змінними напрямками дії двох складових - магнітної індукції поперечного ЗМП та початкового закручування плазмоутворюючого газу; при же зміні напрямку поперечного ЗМП – те ж автоматично змінює свій напрямок на протилежний.

Зміна положення електричної дуги під дією поперечного ЗМП спричиняє суттєву зміну температурних й швидкісних полів факелу плазми, що утворюється у соплі дугового каналу плазмотрону та викликає зміщення максимальних значень температури й швидкості факелу ближче до стінок дугового каналу. Така ситуація викликає збільшення товщини шару охолодженого газу, що рухається з протилежного боку цього каналу.

Модель поетапного формування плазмового факелу під дією поперечного ЗМП на виході з дугового каналу плазмотрону проілюстрована на рис. 2.8.

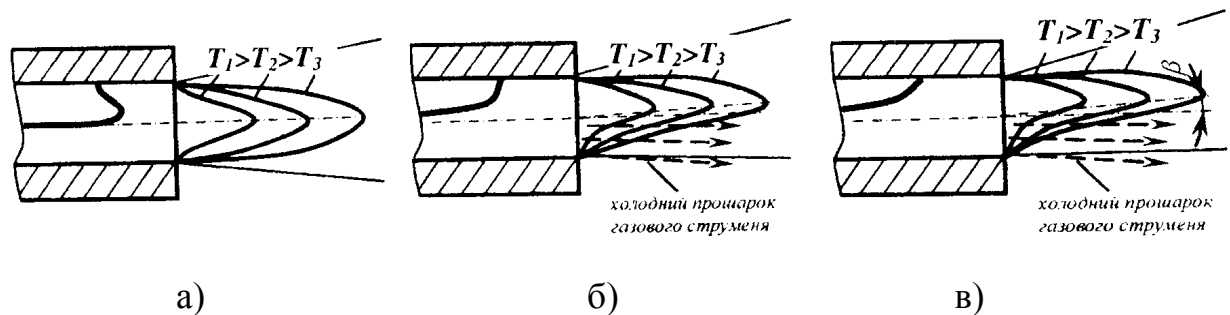


Рисунок 2.8 – Модель поетапного формування температурних полів плазмового факелу під дією поперечного ЗМП на виході із соплового отвору плазмотрону:

а – базовий характер у сопловому отворі (без дії магнітного поля); б – початкова стадія у сопловому отворі під дією магнітного поля; в – подальше поширення за соплом розпилювача під дією магнітного поля при несиметричному розширенні факелу

Підсумовуючи слід зауважити, що остаточне просторове відхилення струменя плазми, що формується на виході з каналу плазмотрону, залежить від особливостей переміщення частини його факелу й ділянки дуги у поперечному перерізі дугового каналу під дією поперечного ЗМП. Сформована таким чином асиметрична форма частини факелу дуги й примусова орієнтація анодної плями на певній частині каналу плазмотрону, визначає зміну температурних й швидкісних полів потоку високотемпературного газу у дуговому каналі та відповідним чином формує процес витікання газового потоку, що характеризується асиметричним температурним й швидкісним полями, та набуття ним несиметричної (по відношенню до повздовжньої осі каналу) форми розширення на виході із сопла плазмотрону.

2.3. Оцінка впливу поперечного ЗМП на параметри потоку плазми

Наступний етап досліджень мав за мету проведення оцінки особливостей впливу ЗМП поперечної дії на гетерофазний потік плазми та характер формування ділянки напilenня (металізаційної плями) утворених плазмою повітря та суміші повітря із C_nH_m при зміні продуктивності напilenня й зміні фракційного складу випадкового матеріалу, що використовується.

Встановлено, що у загальному випадку зміна пропорції газової та порошкової складових гетерофазного потоку плазми визначає значне збільшення товщини плями напilenня при її профільній стабільності. Результати оцінки ділянок напilenня отриманих при розпиленні порошкових матеріалів різного фракційного складу представлені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Результати порівняльної оцінки площ й об'ємів напilених плазмою ділянок покриттів при дії поперечного ЗПМ

Фракція порошку, що напilюється, мкм	Витрата порошку, кг/год	Збільшення ділянки напilenня у поперечному перерізі, %		Збільшення ділянки напilenня у плані, %		Збільшення об'єму ділянки напilenня, %	
		під дією магнітного поля сталого напрямку дії	під дією змінного за напрямком магнітного поля	під дією магнітного поля сталого напрямку дії	під дією змінного за напрямком магнітного поля	під дією магнітного поля сталого напрямку дії	під дією змінного за напрямком магнітного поля
65...100	2,1	35...51	18...30	32...42	21...23	62...73	27...32
	2,4	34...46	17...26	27...33	18...21	51...64	22...26
	3,6	30...34	15...18	21...28	13...14	48...52	15...21
	3,9	28...31	12...15	18...22	11...13	44...49	12...18
100...150	2,2	24...31	10...12	18...26	12...14	31...63	11...25
	2,5	22...30	9...12	16...21	8...11	27...57	9...19
	3,7	20...32	8...16	13...18	6...9	24...53	6...21
	4,0	18...34	7...17	10...15	4...8	22...46	4...18

Дані таблиці 2.2 свідчать про те, що під дією ЗМП поперечної дії спостерігається як збільшення площ так й об'ємів ділянок напilenого плазмового покриття, що спричинене появою просторового зміщення високотемпературної зони газового потоку ближче до вихідного отвору сопла плазмотрону та потрапляння до нього більшої частини порошкового матеріалу. Результатом цього є збільшення площ ділянок напilenня при різних формах організації дії магнітного поля (сталому та змінному) в середньому на 34%...55% у

поперечному перетині, на 30%...44% - у плані та збільшення об'єму на 55%...75% (див. таблицю 2.2). При цьому більші значення приросту площ та об'ємів ділянок напilenня отримані при дії поперечного ЗМП з постійним напрямком дії.

Особливостями формування розмірів плям напilenня при дії знакозмінного поперечного ЗМП, є циклічне переміщення об'єму високотемпературного газу відносно частинок присадкового матеріалу, що позитивним чином відзначається на підвищенні коефіцієнта тепловіддачі від газу до порошку та інтенсифікує процес його нагрівання.

Відмічені певні відмінності під час плазмового напilenня порошків, що володіють феромагнітними властивостями; процес формування ділянки напilenня в такому разі залежить від особливостей характеру взаємодії поперечного ЗМП із частинками порошкового матеріалу, в результаті чого сила, що забезпечує притягання до полюсів електромагніта, формує розширений але розріджений вихідний потік такого матеріалу, що позитивним чином впливає на його рівномірне розподілення в обсязі інтенсивного потоку плазми.

На рис. 2.9 зображені треки факелу при плазмовому напilenні покриття, а на рис. 2.10 представлені у збільшеному масштабі фотографії площ ділянок напilenня у поперечному перерізі й у плані, які свідчать про максимальне збільшення площі та об'єму плями напilenня порошку ПГ-10Н-04, який володіє діамагнітними властивостями при застосуванні поперечного ЗМП.

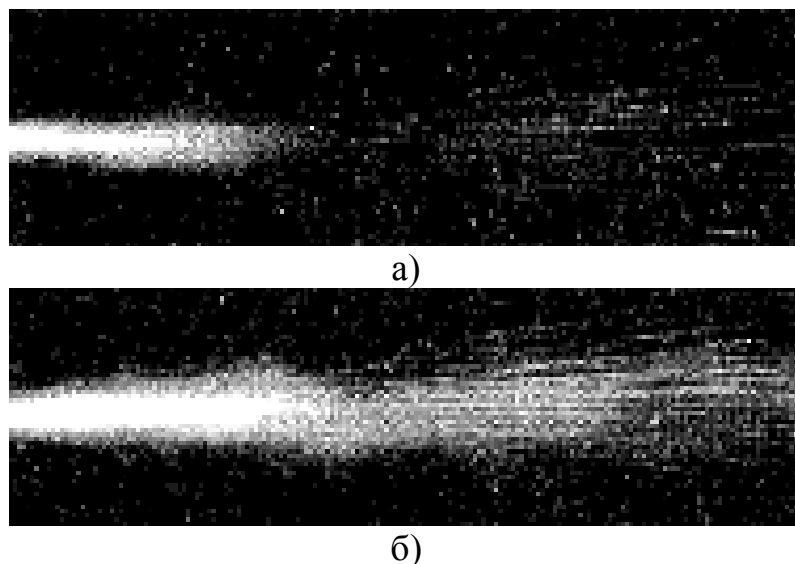


Рисунок 2.9 – Треки факелу при плазмовому напilenні порошку ПГ-10Н-04 при використанні в якості плазмоутворюючого газу повітря:

а - без дії ЗМП; б - при застосуванні ЗМП сталого напрямку поперечної дії.

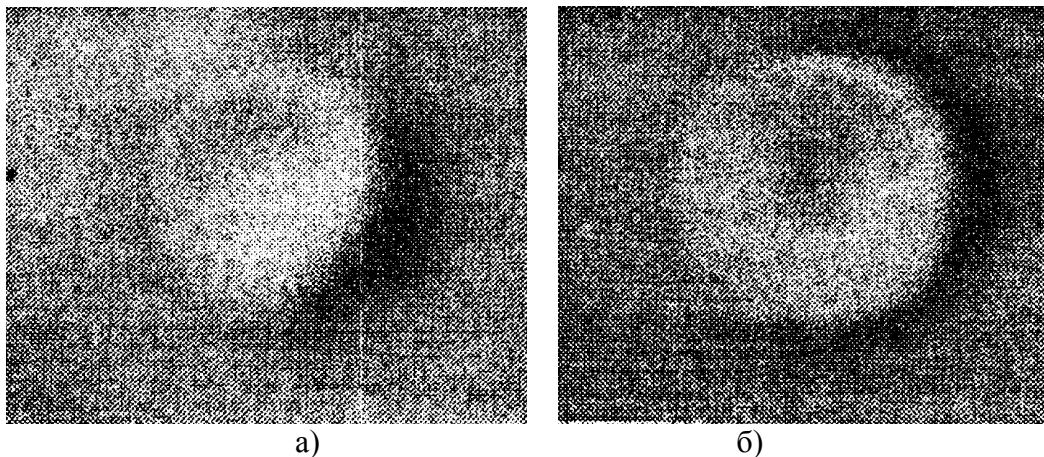


Рисунок 2.10 – Фотографії ділянок напilenня, отримані плазмовим напilenням порошку ПГ-10Н-04 при використанні в якості плазмоутворюючого газу повітря:

а - без дії ЗМП; б - при застосуванні ЗМП сталого напрямку поперечної дії.

Не можна не відмітити й того факту, що застосування суміші повітря із вмістом C_nH_m (наприклад, пропан-бутану) ефективність впливу поперечного ЗМП на продуктивність процесу напilenня, у порівнянні із плазмою утвореною самим повітрям, не суттєво, але знижується. Поясненням цього є значно більша за розмірами активна зона плазмового факелу, в якій відбувається більш інтенсивний нагрів та прискорення дисперсного матеріалу, що позитивним чином впливає на ефективність протікання процесу напilenня.

2.4. Дослідження ефективності та якості процесу плазмового напilenня покриттів при дії поперечного ЗМП

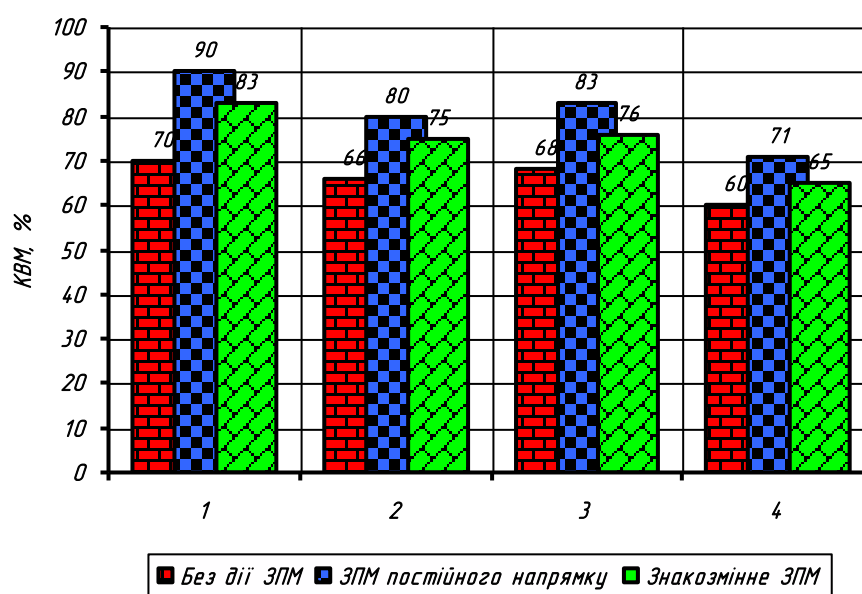
В першу чергу слід зазначити, що єдиним узагальнюючим оціночним параметром процесу плазмового напilenня покриттів при дії поперечного ЗМП, що безпосередньо визначає й впливає на його ефективність, було прийнято *KEBM*; натомість як змінними технологічними параметрами процесу виступали витрата й фракційний (гранулометричний) склад матеріалу (порошку), що напильовався.

Аналіз результатів цих досліджень, представлений на рис. 2.11 а, б показав, що при використанні феромагнітного порошку (ПГ-10Н-04) спостерігається значна перевага у значеннях *KEBM* у порівнянні із діаманітним порошком (ПТ-19Н-01), що пояснюється додаванням до загальних факторів підвищення ефективності процесу нагрівання порошку, ще й додаткового - впливу зовнішнього магнітного поля на частинки присадкового матеріалу.

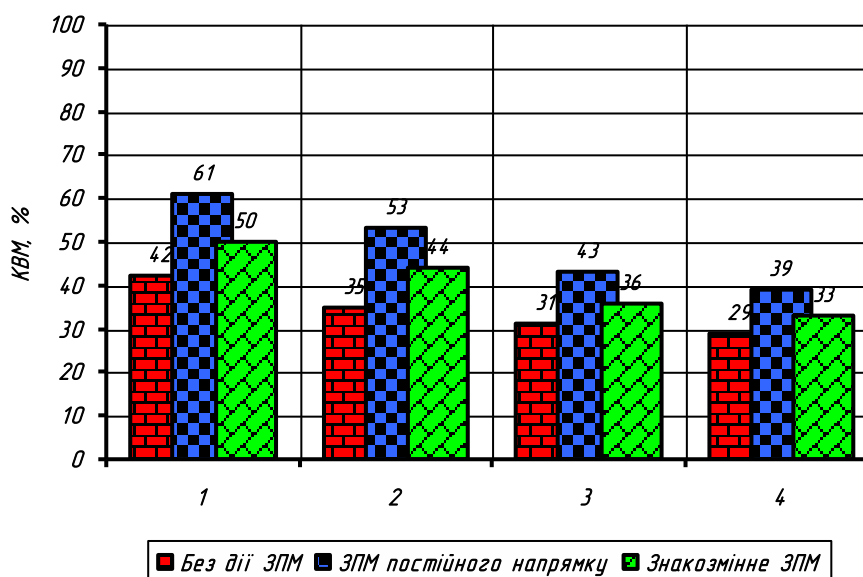
При напilenні композиційного порошку під дією ЗМП, формується більш

ймовірна картина появи екзотермічної взаємодії компонентів у окремій частинці, що підвищує інтенсивність її нагріву й визначає інтенсивне збільшення ростання *KEBM* (рис. 2.11 в). Використання же суміші повітря із вмістом C_nH_m також сприяє покращенню питомих енергетичних характеристики плазмового факелу та зумовлює при відсутності дії поперечного ЗМП підвищення *KEBM* (рис. 2.11 г).

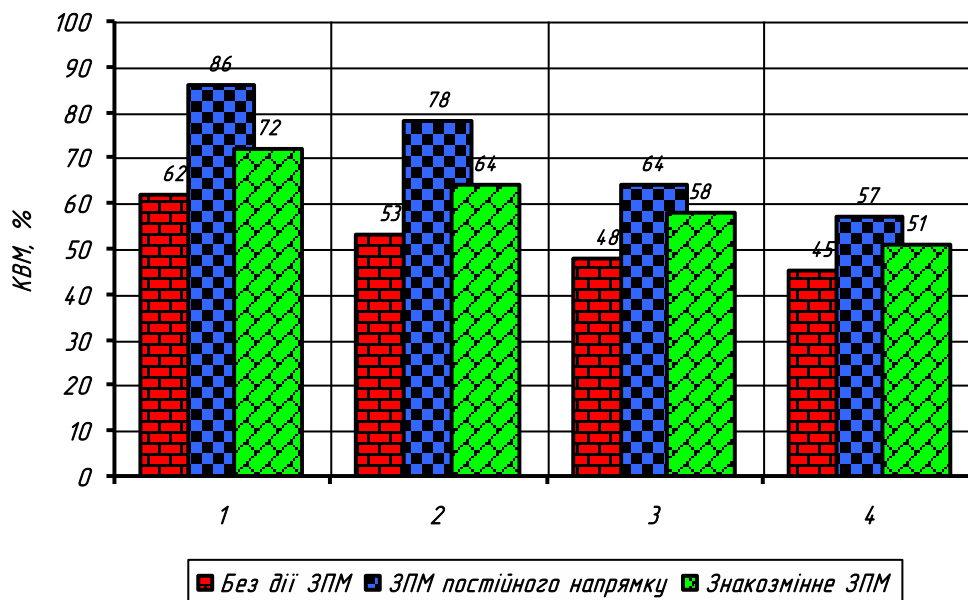
Оцінюючи же ефективність застосування при плазмовому напиленні ЗМП поперечної дії за експериментальними даними наведеними на рис. 2.12 та у таблиці 2.3, слід визнати її високою, за рахунок формування покриттів із меншими показниками пористості у всіх без виключення зонах ділянки напилення.



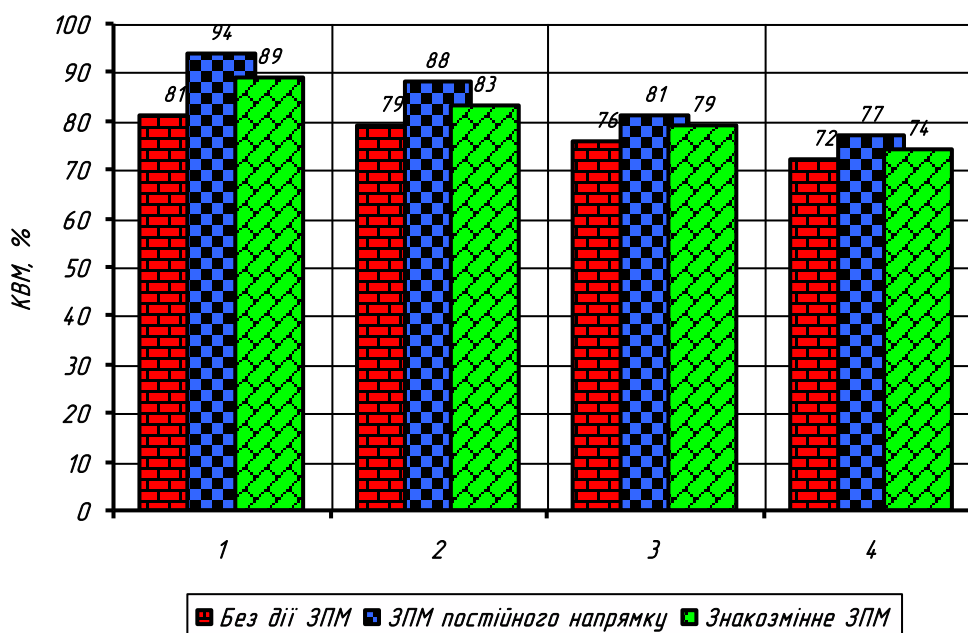
а)



б)



В)

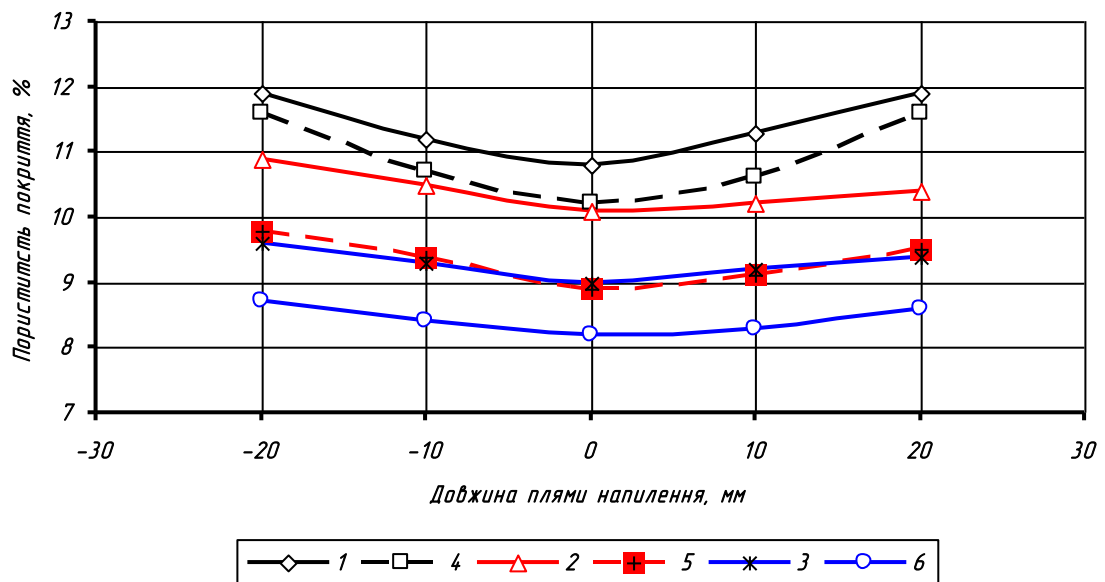


Г)

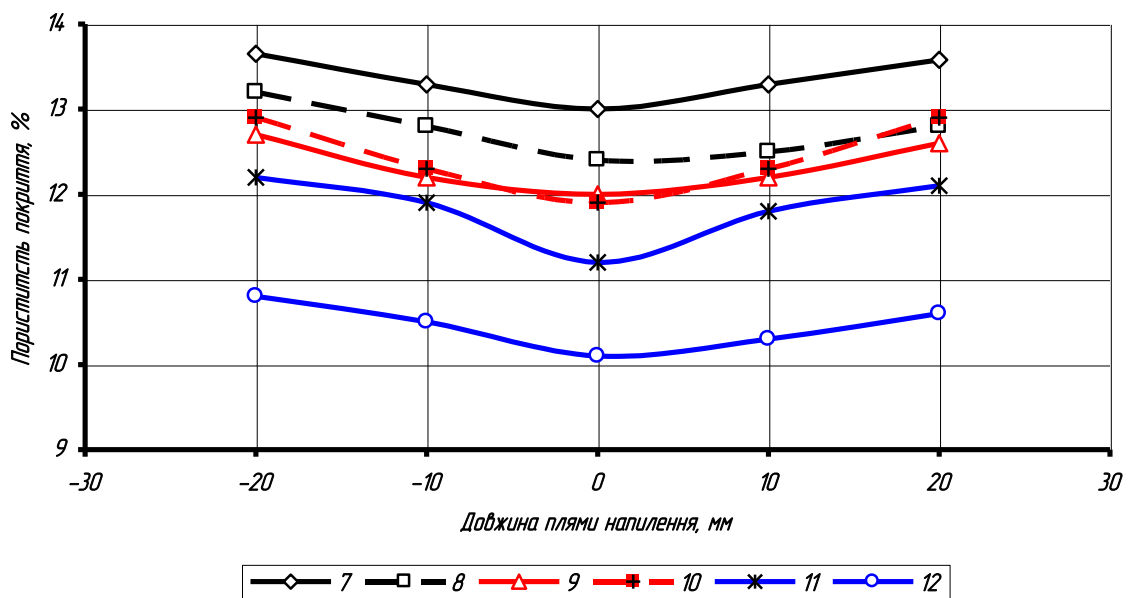
Рисунок 2.11 – Зміна $KEVM$ при плазмовому напиленні різних типів порошків й параметрах плазмоутворювального газу та дії поперечного ЗМП:

а – порошок ПГ-19М-01 (діамагнітний тип); б – порошок ПГ-10Н-04 (феромагнітний тип); в – порошок ПТ-19Н-01 (складний склад); г - суміш повітря із вмістом C_nH_m при використанні порошку ПТ-19Н-01 (складний склад);

1 – фракція порошку 65...100 мкм при витраті 2,1 кг/год.; 2 - фракція порошку 65...100 мкм при витраті 3,9 кг/год.; 3 - фракція порошку 100...150 мкм при витраті 2,2 кг/год; 4 - фракція порошку 100...150 мкм при витраті 4,0 кг/год.



а)



б)

Рисунок 2.12 – Пористість покриття за довжиною (l) ділянки наплення при плазмовому напленні порошку марки ПГ-10Н-04 та використанні повітря у якості плазмоутворюючого газу:

а – фракція порошку 65...100 мкм, б – фракція порошку 100...150 мкм

1, 7 та 4, 10 - без впливу поперечного ЗМП та витратою порошку 4,0 кг/год й 2,1 кг/год; 2,8 та 5,11- із ЗМП перемінної дії та витратою порошку 4,0 кг/год. та 2,1 кг/год; 3,9 та 6,12 - із ЗМП постійного напрямку та витратою порошку 4,0 кг/год. та 2,1 кг/год.

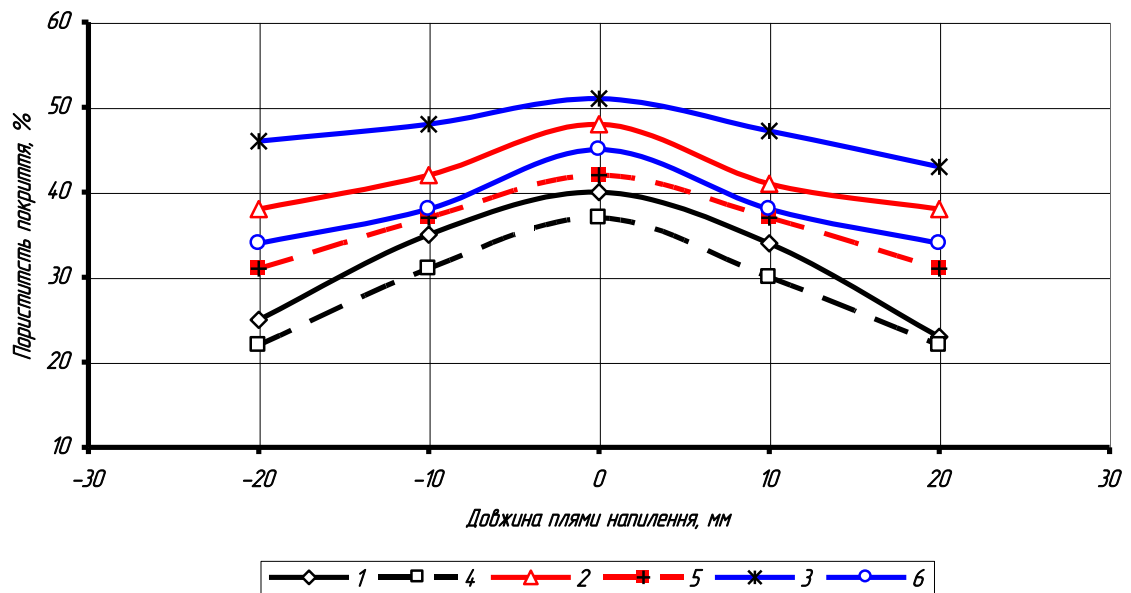
Таблиця 2.3 – Порівняльні характеристики зміни пористості напиленого шару металу при дії поперечного ЗМП та без такої дії

Фракція порошку, що напилюється, мкм	Витрата порошку, кг/год	Характер зміни пористості у центрі ділянки плями напилення, %		Характеру зміни пористості у периферійних зонах ділянки напилення, %	
		під дією магнітного поля сталого напрямку дії	під дією змінного за напрямком магнітного поля	під дією магнітного поля сталого напрямку дії	під дією змінного за напрямком магнітного поля
65...100	2,1	-24...-33	-35...-42	-15...-24	-22...-31
	2,4	-23...-31	-30...-35	-12...-18	-18...-25
	3,6	-20...-26	-25...-31	-8...-13	-14...-18
	3,9	-19...-25	-22...-30	-7...-11	-12...-16
100...150	2,2	-15...-18	-18...-22	-6...-9	-11...-14
	2,5	-13...-16	-16...-20	-5...-7	-8...-12
	3,7	-8...-13	-12...-16	-4...-6	-6...-10
	4,0	-6...-12	-10...-15	-3...-4	-4...-8

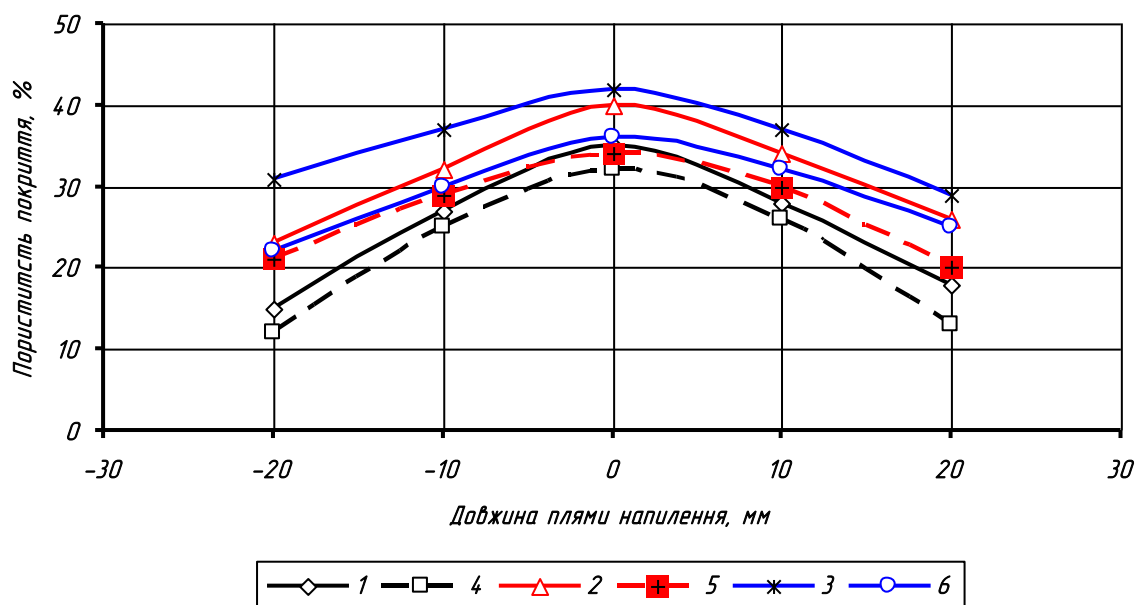
Причиною цього, є підвищення загального температурного рівня в зоні появи порошкового матеріалу та вирівнювання температурних градієнтів й прискорення всієї сукупності частинок порошку, які потрапили до струменя плазми.

Дослідженнями встановлено, що показники пористості напилених покриттів отриманих під впливом поперечного ЗМП постійної дії є кращими, за аналогічні, але сформовані полем із знакозмінною магнітною характеристикою, що пояснюється наявністю у першому варіанті жорсткого фіксованого просторового положення каналів газу та порошку, що спільно рухаються у гетерогенному потоці. Поясненням цього, є відсутність компенсації падіння змінного температурного рівня у активній зоні плазмового факелу, що супроводжується активізацією процесів теплообміну в процесі переміщення газової фази по відношенню до порошкової.

Оцінюючи отримані результати можна зробити висновок про те, що перевищення витрати порошкового матеріалу, понад певне її критичну величину, сприяє появі негативного результату й забезпечує зростання рівня пористості напиленого матеріалу (див. рис. 2.12 та таблицю 2.3). Також визначено, що ЗМП поперечної дії позитивним чином впливає на показники міцності зчеплення напиленого металу із основою, збільшуючи їх за всією довжиною ділянка напилення, як підсилюючи й існуючий зв'язок між витратою порошку та його фракційним складом (рис. 2.13, таблиця 2.4).



а)



б)

Рисунок 2.13 – Міцність зчеплення напеного покриття з основою за довжиною (l) ділянки наплення при плазмовому напленні порошку ПГ-19М-01 та використанні повітря у якості плазмоутворюючого газу:

а- фракція порошку 65...100 мкм; б – фракція порошку 100...150 мкм.

1,4 - без ЗМП й витраті порошку 2,1 та 4,0 кг/год; 2,5 - під дією знакозмінного ЗМП та витраті порошку 2,1 та 4,0 кг/год; 3,6 - під дією ЗМП постійного напрямку та витраті порошку 2,1 та 4,0 кг/год.

Таблиця 2.4 – Порівняльні характеристики зміни показників міцності зчеплення напиленого шару металу при дії поперечного ЗМП та без такої дії

Фракція порошку, що напилюється, мкм	Витрата порошку, кг/год	Характер зміни міцності зчеплення напиленого покриття у центрі ділянки напилення, %		Характер зміни міцності зчеплення напиленого покриття у периферійних зонах ділянки напилення, %	
		під дією магнітного поля сталого напрямку дії	під дією змінного за напрямком магнітного поля	під дією магнітного поля сталого напрямку дії	під дією змінного за напрямком магнітного поля
65...100	2,1	+22...+25	+17...+21	+45...+53	+37...+48
	2,4	+20...+23	+14...+19	+41...+50	+36...+45
	3,6	+18...+22	+13...+17	+38...+49	+33...+40
	3,9	+16...+19	+12...+15	+37...+46	+31...+38
100...150	2,2	+17...+23	+10...+16	+36...+55	+26...+44
	2,5	+15...+21	+8...+13	+34...+52	+24...+41
	3,7	+13...+17	+6...+12	+33...+50	+22...+37
	4,0	+10...+15	+5...+11	+31...+48	+20...+35

Результати проведеного металографічний аналіз напилених покриттів, представлені на рис. 2.14 та рис. 2.15 підтверджують наявне покращення структури нанесених плазмовим напиленням покриттів при застосуванні ЗМП поперечної дії у порівнянні із покриттями, що були отриманими без дії магнітного поля.

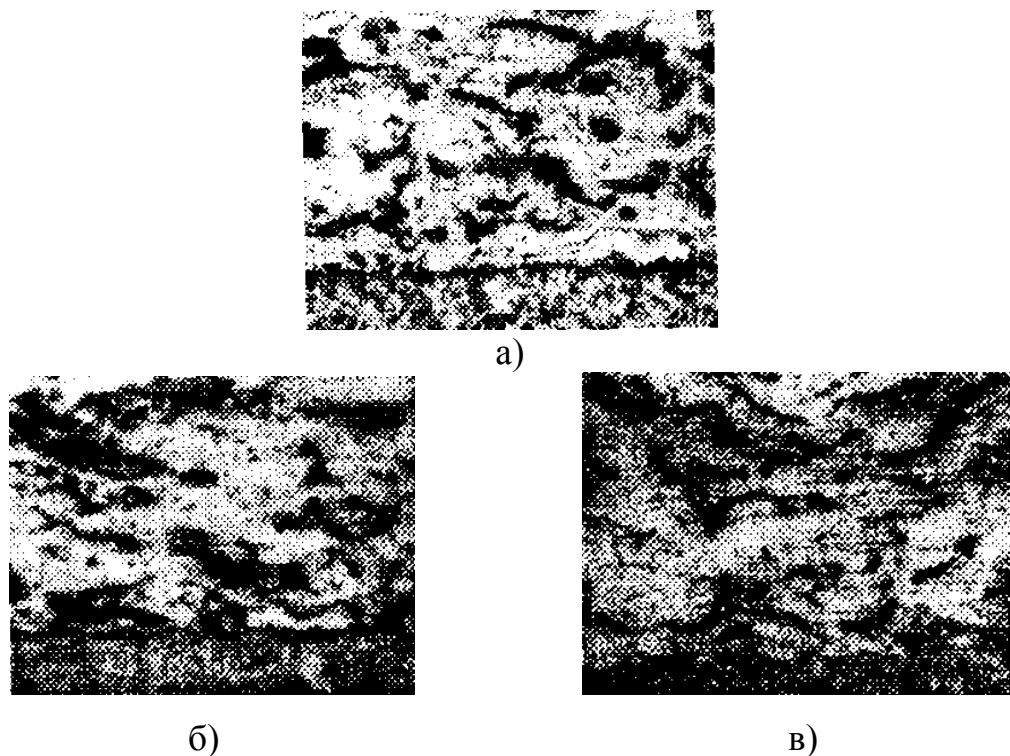


Рисунок 2.14 - Мікроструктури плазових покриттів утворених при напиленні порошку ПГ-19М-01 та використанні повітря у якості плазмоутворюючого газу (×400):

а – за відсутності дії ЗМП; б - при дії змінного поперечного ЗМП (частота 50 Гц); в - при активації поперечного ЗМП сталої дії.



а)



б)



в)

Рисунок 2.15 - Мікроструктури плазових покриттів утворених при напиленні порошку ПГ-10Н-04 та використанні повітря у якості плазмоутворюючого газу ($\times 400$):

а – за відсутності дії ЗМП; б - при дії змінного поперечного ЗМП (частота 50 Гц); в - при активації поперечного ЗМП сталої дії.

Аналіз наведених на рис. 2.14 та рис. 2.15 мікроструктур показав, що вплив сталого поперченого ЗМП постійної дії зумовлює значно більший ступінь деформації частинок порошку, ніж при плазовому напиленні без дії ЗМП; крім того, на мікрошліфах відсутня чітко виражена спільна границя між окремими затверділими частинками металу й цими частинками та основою (деталлю).

Більш того, плазове покриття нанесене при дії поперечного ЗМП сталої дії характеризується меншим градієнтом твердості за товщиною, на відміну від покриттів отриманих традиційною технологією (без дії ЗМП), що пояснюється покращенням (вирівнюванням) параметрів процесів нагрівання й прискорення для більшого обсягу частинок порошку, що позитивним чином впливає й на зменшення рівня ймовірності утворення у покритті структурних дефектів.

Для оцінки рівня стійкості отриманих плазових покриттів напилених при дії поперечного ЗМП до абразивного зношування, були виконані лабораторні дослідження із застосуванням приладу ЛКИ-3 при дії сили 150 Н та швидкості 30

м/хв., які показали підвищення рівня зносостійкості покриттів у 1,5...2,0 (у порівнянні із традиційним плазмовим напиленням) в залежності від виду дії поперечного ЗМП (сталого або змінного) (рис. 2.16).

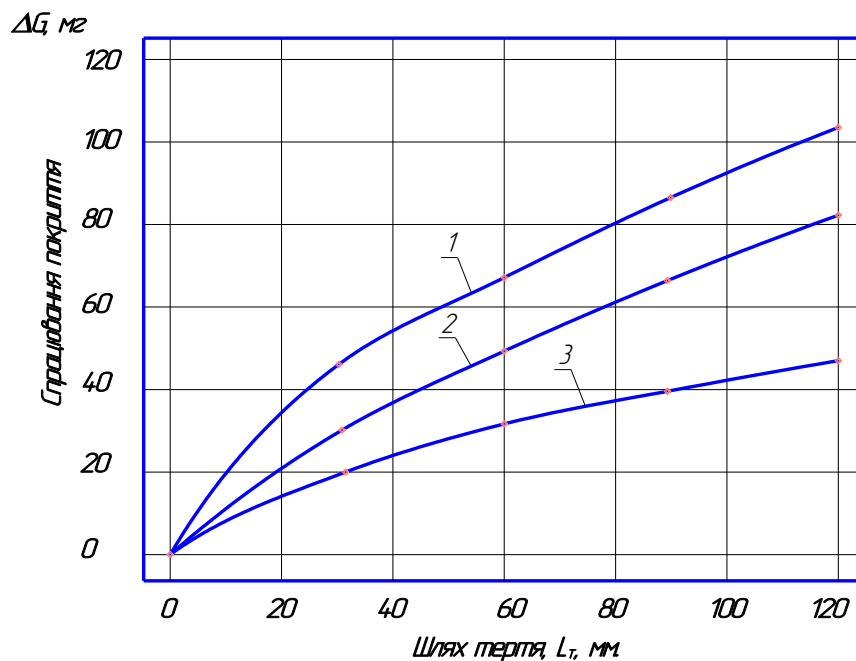


Рисунок 2.16 – Особливості зношування напиленого плазмового покриття (ΔG) при зміні довжини шляху тертя (L_T):

а – за відсутності дії ЗМП; б - при дії змінного поперечного ЗМП (частота 50 Гц); в - при активації поперечного ЗМП сталої дії.

Розділ 3.

ПІДГОТОВКА ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ ПЕРЕД НАНЕСЕННЯМ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ

3.1. Методика та режими попередньої підготовки поверхні перед напиленням плазмового покриття

Формування на поверхнях валів покриттів, що наносяться технологіями напилення (плазмового, електродугового, газотермічного та ін.) для компенсації зношеного в експлуатаційних умовах обсягу металу, передбачає послідовне виконання таких процесів, як: видалення продуктів зношення та надання поверхні деталі правильної геометричної форми, підготовка цієї поверхні під наступне нанесення покриття, безпосередньо саме нанесення покриття та заключна (фінішна) механічна обробка під необхідний розмір [3; 4; 5]. Найбільші відповідальним процесом в цій технології є процес підготовки поверхні деталі під покриття, яке буде нанесене, так як саме цей процес забезпечує необхідний рівень майбутньої адгезії в парі «деталь - покриття» та необхідні фізико-механічні властивості з'єднання основного металу деталі із шаром термічно розпиленого присадкового матеріалу [5].

Дослідження ефективності промислового застосування технологій напилення зносостійких покриттів на інших вітчизняних машинобудівних та ремонтних підприємствах показали, що найбільш часто використовуються такі способи попередньої підготовки поверхонь під напилення як: механічна ударна обробка металевим дробом (наклепування), формування різьбових поверхонь токарним способом й оплавлення поверхонь електричною дугою. Застосовуються й інші способи (наприклад, дернування або електро-механічна обробка), але менш часто та із гіршими показниками ефективності та витратності.

Саме тому, подальші дослідження були спрямовані на оцінку показників міцності зчеплення нанесених покриттів з поверхнями, параметри яких були сформовані зазначеними вище технологіями їх попередньої підготовки.

Перший етап підготовчого процесу передбачав видалення поверхонь зразків бруду та жирових відкладень й здійснювався шляхом промивання деталей у спеціальному миючому розчині (на основі спирті або розчиннику) із наступним

протирання ювенільно чистим обтирочним матеріалом (наприклад, серветкою із мікрофібри) та фінішним просушуванням.

Формування різьбової поверхні на дослідних зразках виконували на токарному верстаті моделі 16Б16А при забезпеченні оптимальних режимів різання, що в результаті дозволяло сформувати ділянки із найвищими показниками зчеплення напиленого покриття із поверхнею зразків. Різьбова поверхня формувалася прохідним різцем (кут загострення ріжучої кромки 55^0) за 2 його проходи. Режими різання відрізнялися для зразків, що піддавалися випробуванням на витривалість, кручення та зріз й зразків - що піддавалися випробуванням на розтяг. Для першої групи зразків параметри сформованої різьбової поверхні забезпечували глибину профілю $h = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м при кроку витків $t = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м, натомість як для другої - $h = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м, $0,4 \cdot 10^{-3}$ м та $t = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м.

При електродуговому способі підготовки, поверхню обробляли іскровим розрядом (напруга в дузі $V = 20...25$ В, сила струму $I = 130...150$ А), який виникав між вугільним електродом ($d = 0,006$ м), що не плавиться, й дослідним зразком, що в результаті розбризкування розплавленого металу під дією потоку стисненого повітря ($P = 0,15...0,20$ МПа) дозволяло сформувати на поверхнях западини.

Механічна обробка дробом застосовувалася в якості фінішної операцію підготовчого процесу.

Забезпечення високих значень зносостійкості й межі міцності напилених порошком ПГ-19М-01 плазмових покриттів на поверхнях зразків досягали підтриманням оптимальної відстані від сопла плазмотрону до зразку $L = (85...95) \cdot 10^{-3}$ м, що напиляється. Іншими режимними параметрами процесу плазмового напилення зносостійких покриттів, які забезпечували стійкість горіння плазмової дуги були:

- тиску повітря $P_{нов} = 0,6$ МПа та сила струму в діапазоні - $I = 40...75$ А;

- товщина напиленого шару із припуском на сторону - $h = (0,8...1,6) \cdot 10^{-2}$ м (для забезпечення видалення шару металу при наступній механічній обробці);

- повздовжня (лінійна) подача плазмотрону, щодо поверхні зразка становила - $s = 0,0012...0,0017 \text{ м/об}$;
- частота обертання зразку при плазмовому напиленні – $n = 0,33 \text{ с}^{-1}$;
- тривалість часового інтервалу між підготовчими операціями очищення та формування поверхні й безпосередньо самою операцією напилення плазмового покриття на поверхні зразків - не більше $T = 2,0 \text{ год}$.

Випробування зразків на ударну в'язкість покриттів на їх поверхнях проводилося при їх швидкісному повороті із дотриманням сталих температурних значень поверхні $t = 60...70 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Напилений шар після нанесення піддавався за інтенсивного охолодження мийною емульсією шліфуванню із використанням шліфувального кола виготовленого з електрокорунду.

3.2 Дослідження міцності зчеплення напиленого покриття із поверхнею деталі при різних способах попередньої підготовки цієї поверхні

Проведеними експериментальними дослідженнями встановлено, що початок руйнування нанесеного плазмового покриття співпадав із руйнуванням основного металу зразку, що відповідало величині межі міцності металу покриття $\sigma = 1,76...1,96 \text{ кПа}$ при підтриманні необхідної відстані від сопла плазмотрону до оброблюваної поверхні $L = 75...100 \text{ мм}$.

Результати проведених досліджень механічних характеристик напилених зразків, отриманих на поверхнях виготовлених із сталі 45, при різних способах попередньої підготовки наведені на рис. 3.1, показують характеристику механічних властивостей основного металу, так як напилений шар покриття руйнується й відокремлюється від поверхні зразку при початкових тестових напруженнях не досягаючи напружень $\sigma = 40,0...80,0 \text{ МПа}$ руйнування матеріалу зразка. Поясненням відмінності отриманих величин міцності зразків, що брали участь у експериментах, є різні способи підготовки поверхонь, що забезпечувало й різний фізичний стан поверхневого шару основного металу зразків на початок випробувальних тестів.

Графічні дані наведені на рис. 3.1 дозволяють зробити наступний висновок: найвищими механічними показниками характеризуються зразки, поверхні яких перед

плазмовим напиленням попередньо піддавалися механічній обробці металевим дробом (див. рис. 3.1, поз. 4). У цих зразків виявлено підвищення меж пропорційності й текучості та значне підвищення межі міцності (на розтяг), пояснюється отриманим ефектом зміцнення (наклепування) оброблених дробом поверхонь.

Оцінюючи ефективність підготовки поверхні при створенні на ній різьбової структури, можна відзначити, що це обумовлює появу низки негативних факторів, першим й основним серед яких є зменшення площі поперечного перерізу матеріалу деталі та, відповідно, суттєве зменшення опору матеріалу на розрив; іншим негативним фактором виступають надрізи матеріалу, які є невід'ємною частиною процесу формування різьбової поверхні, що також формують додатковий негативний внесок до зниження міцності деталі.

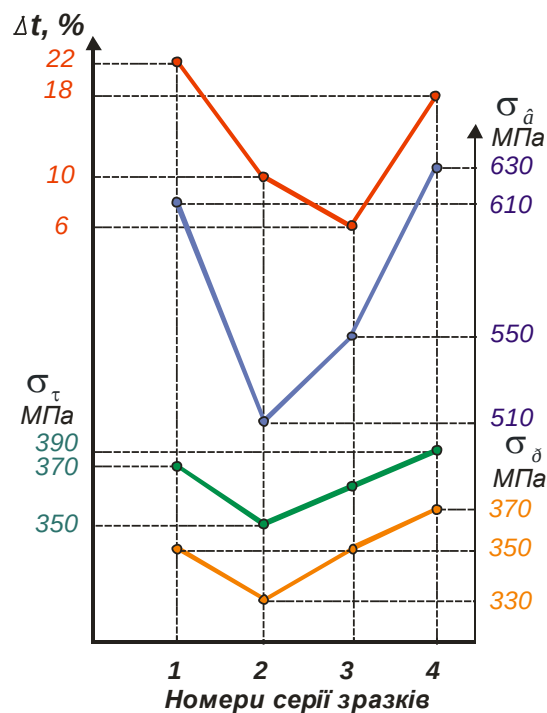


Рисунок 3.1 - Міцність (на розтяг) зразків зі сталі 45 із нанесеним плазмовим покриттям та різними різними способами попередньої підготовки поверхні:

- 1 - без попередньої підготовки; 2 – формування різьбової поверхні;
3 - електродугове опалення; 4 – механічна обробка дробом

Використання технології опалення поверхні електродуговим способом, також не дозволяє отримати суттєвих переваг, натомість як негативні моменти при цьому були виявлені. До них можна віднести появу твердого, хоча й тонкого шару покриття на поверхні металу, який сформувався в результаті процесу загартування, опіки та інші дефектів, які при сукупній дії значно знижують механічні властивості металу деталі.

Виконана оцінка впливу технологічних факторів на механічні властивості

напиленого плазмою порошкового металу визначені при випробуваннях на скручування, показала пряму залежність отриманих характеристик від способу підготовки робочої поверхні зразків: у сформованому шарі металу при кутах скручування $\gamma = 8...18^\circ$ висока ймовірність виникнення тріщин, що можуть підсилюватися при збільшенні величин кутів закручування. На рис. 3.2 та рис. 3.3 наведено фото фіксація характерних моментів процесів руйнування нанесених шарів плазмового покриття (його відшаровування й відриву від основного металу зразка) із збільшенням значень кутів закручування в діапазоні до 60° й більше.

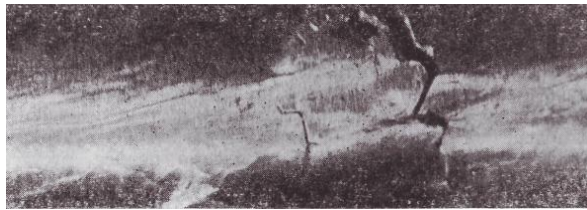


Рисунок 3.2 – Утворення тріщини й руйнувань у плазмовому покритті, що з'являються при кутах закручування зразків $\gamma = 8...18^\circ$

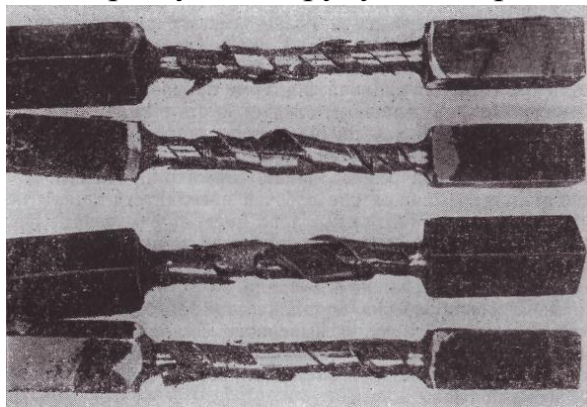


Рисунок 3.3 – Етапи процесу тріщиноутворення й відшарування напиленого шару плазмового покриття при випробуваннях зразків на кручення із попередньою підготовкою їх поверхонь нанесенням різьбового профілю й оплавленням електричним дуговим розрядом

Проведені випробувальні дослідження дозволили для кожної серії зразків побудувати графічні залежності зміни величини крутного моменту $M_{кр}$ від кута закручування γ та розраховані максимальні величини $M_{кр}$, які сприймаються шаром напиленого покриття до моменту початку його руйнування (рис. 3.4 та рис. 3.5).

Розрахунки $M_{кр}$ виконувалися із використанням виразу:

$$M_{к1} = M_{к} - M_{к2}, \quad (3.1)$$

де $M_{к}$ - максимальний крутний момент, який витримує зразок із нанесеним плазмовим покриттям до моменту утворення тріщин у шарі металу покриття;

M_{kl} - максимальний крутний момент, який витримує шар металу покриття, нанесеного плазмовим напиленням, до початку його руйнування;

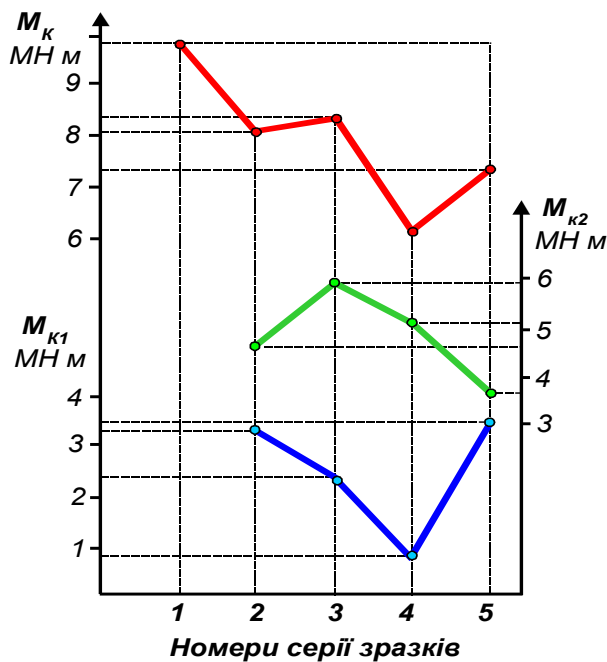


Рисунок 3.4 – Максимальні крутні моменти $M_{кр}$ зразків із сталі 45 із шаром наиленого покриття до початку утворення зовнішніх тріщин (при зміні товщини шару покриття h та способів попередньої підготовки поверхні):

- 1 - без попередньої підготовки; 2 – формування різьбової поверхні ($h = 1,6 \text{ мм}$);
3 - електродугове оплавлення ($h = 0,8 \text{ мм}$); 4 – механічна обробка дробом ($h = 0,8 \text{ мм}$)

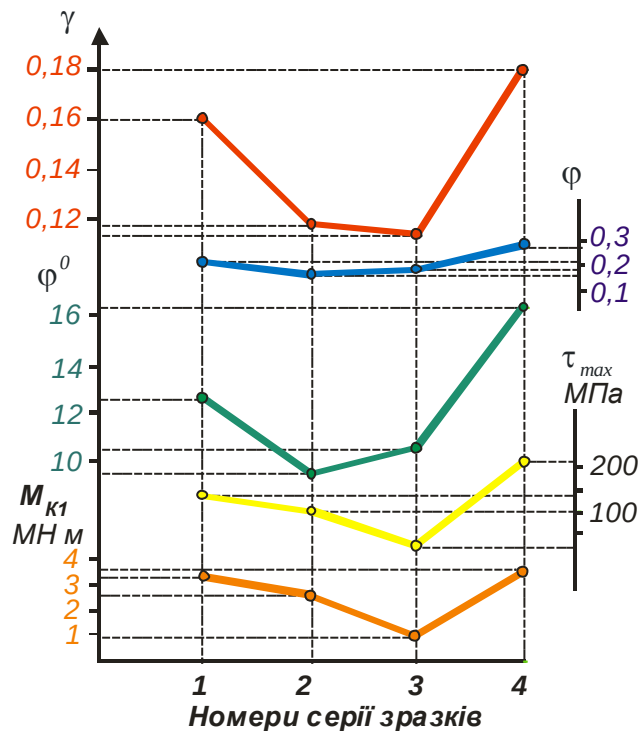


Рисунок 3.5 - Характеристики міцності на кручення шарів напиленого плазмового покриття (при зміні товщини шару покриття h та способів попередньої підготовки поверхні):

- 1 - без попередньої підготовки; 2 – формування різьбової поверхні ($h = 1,6 \text{ мм}$);
3 - електродугове оплавлення ($h = 0,8 \text{ мм}$); 4 – механічна обробка дробом ($h = 0,8 \text{ мм}$)

$M_{\kappa 2}$ - крутний момент, який сприймається основним металом зразку до утворення тріщин у шарі металу покриття нанесеного плазмовим напиленням.

Оцінку величин максимальних напружень поверхні напиленого металу при його руйнуванні на зсув проводили за виразом:

$$\tau_{max} = \frac{M_l}{W_p}, \quad (3.2)$$

де W_p - момент опору металу напиленого покриття на кручення.

Максимальний відносний зсув матеріалу при руйнуванні визначався як:

$$\gamma = \frac{\varphi^0 \cdot d \cdot \pi}{2l \cdot 180}, \quad (3.3)$$

де d - зовнішній діаметр деталі із нанесеним покриттям.

Механічні властивості основного металу з напиленням плазмовим покриттям при випробуваннях на кручення визначалися виходячи із значень максимального крутного моменту та максимального кута закручування, які витримували зразки до їх руйнування, який визначався за початком появи процесу відокремлення напиленого шару металу (рис. 3.6).

Виявлено, що покриття, яке було нанесено плазмовим напиленням на поверхню без попередньої її підготовки, характеризується порівняно низькими значеннями максимальних напружень на зсув - $\tau_{max} = 45,5...206,3 \text{ МПа}$, натомість як найвищими значеннями максимальних напружень за цим показником вволодіють плазмові покриття, нанесені на попередньо оброблені металевим дробом поверхні, а найнижчими – покриття, на поверхні під яке попередньо піддавалися електродуговому оплавленню.

Дослідження виявили також значний вплив фізичних параметрів робочої поверхні зразків на формування фізико-механічних властивостей напилених плазмових покриттів, в більшій мірі на підвищення твердості й крихкості металу, характерні для порівняно незначних кутів закручування ($\varphi = 9,5...16,5^0$) до руйнування, на які вказують надто низькі значення величин найбільших відносних зсувів ($\gamma = 0,01...0,018$) до початку руйнування.

Дослідженнями на кручення також підтверджено значний вплив технології попередньої підготовки поверхонь зразків на формування механічних властивостей

напилених покриттів. Виявлено, що підготовчі операції із створення різьбової структури та використання електродугового оплавлення значно знижують механічні властивості основного металу, що обумовлює відносно низькі значення опору при дії крутного моменту у металі, нанесеному плазмовим напиленням.

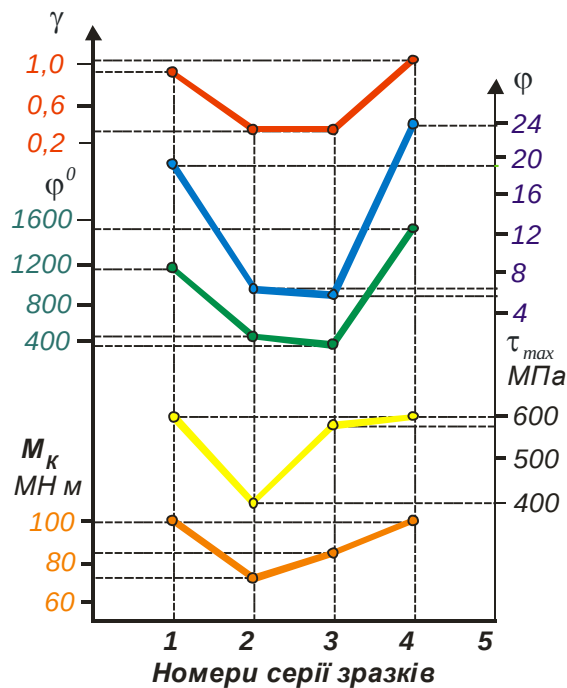


Рисунок 3.6 - Міцність на кручення зразків із сталі 45 після відшарування напиленого плазмою металу в залежності від способів попередньої підготовки поверхні:

- 1 - без попередньої підготовки; 2 – формування різьбової поверхні ($h = 1,6 \text{ мм}$);
- 3 - електродугове оплавлення ($h = 0,8 \text{ мм}$); 4 – механічна обробка дробом ($h = 0,8 \text{ мм}$)

Слід зауважити, що проведені випробування виявили достатньо низькі значення меж витривалості сталейних зразків із шаром нанесених покриттів й поганий опір цих покриттів крутному моменту. Саме тому, було прийнято рішення щодо проведення додаткових досліджень, які мали на меті визначення ефективності застосування додаткових зміцнюючих технологій в контексті підвищення властивостей нанесених плазмових покриттів. Такими технологіями стали - загартування струмом високої частоти (СВЧ) та ціанування.

Режим загартування напиленого покриття товщиною $h = 0,8 \text{ мм}$ із наступним нагрівом СВЧ був визначений експериментально та передбачав застосування індуктора із внутрішнім діаметром $d = 22,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, діаметром зразків $d_{det} = 10,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ із нанесеним плазмовим покриттям та наявним зазором між індуктором й зразком - $\Delta = 5,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Процес обробки зразків

супроводжувався їх обертанням навколо повздовжньої осі із поступальною подачею за швидкості $V = 10,9 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. Для охолодження зразків використовувалася емульсія, яку струменями подавали кільцевим спреєром, встановленим одразу після індуктору на відстані $H = 0,001 \dots 0,002 \text{ м}$. Обробку проводили при величині струму на аноді $I_a = 1,6 \text{ А}$, струму мережі $I_{\text{мер}} = 0,24 \text{ А}$ та напрузі на аноді $V_a = 770 \text{ В}$, при використанні генератору для індукційного нагріву потужністю $N = 45 \text{ кВт}$ та частотою коливань 500 кГц .

Ціанування зразків із нанесеним плазмовим шаром покриття виконували ванним способом протягом 3 хв. із наступним охолодження на повітрі, що дозволяло отримати товщину зміцненого поверхневого шару $h = (0,05 \dots 0,06) \cdot 10^{-3} \text{ м}$. В якості електроліту була використана суміш із вмістом 95% хлористого барію $BaCl$ й 5% ціаністої солі $NaCN$ температура якої становила 900° С .

Проведені дослідження можливості зміцнення напиленого на зразки виготовлені зі сталі 45 шару покриття показала, що проведені процеси нормалізації та обробки металевим дробом, електродугового розпилення і шліфування нанесеного металу й фінішного загартування СВЧ жодним чином не вплинули на зміну механічних властивостей нанесеного плазмового покриття. Застосування ціанування, в якості фінішної зміцнюючої операції – виявило підвищення механічних властивостей напиленого шару покриття. Зразки пройшли успішно випробування на кручення до руйнування показавши кут закручування $\gamma = 1632^{\circ}$ при відсутності появи тріщин у нанесеному металі покриття (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 - Результати випробування зразків із напиленими плазмовими покриттями на міцність після ціанування

Характеристика зразку	Повний кут закручування до руйнування, ...		Максимальні напруження зсуву на поверхні до руйнування τ_{max} , МПа	Максимальний відносний зсув поверхні до появи руйнування γ , рад.
	град.	рад.		
Сталь 45 нормалізована + метал товщиною шару $h = 0,92 \text{ мм}$ напилений плазмовим способом, ціанування на глибину $0,05 \dots 0,06 \text{ мм}$, обробка поверхні зразків металевим дробом	1632,0	28,56	410,0	1,80

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В представленій магістерській роботі проведені дослідження напрямків підвищення ефективності нанесення газотермічних покриттів плазовим напиленням в активному зовнішньому середовищі – магнітному полі поперечної дії. Дану технологію рекомендовано до впровадження у виробничий процес машинобудівного підприємства ТОВ «Ремсинтез» при відновленні та/або зміцненні валів с.-г. та автомобільної техніки, як таку, що забезпечує їх підвищені ресурсні показники й показники стійкості до абразивного та гідроабразивного видів зношування. Перевагами даного методу наплавлення є: високий рівень продуктивності наплавлення – понад 25 кг/год, ефективність наближена до 88%; низький рівень термічного впливу на основний матеріал деталі при забезпеченні лише 5% розчинності основного металу в наплавленому шарі та мінімальні витрати присадкового матеріалу за умови наплавлення тонких - 0,5...5,0 мм покриттів.

Для цього в першому розділі роботи «Визначення актуальних напрямків досліджень» визначені особливості організації та виробничої діяльності машинобудівного підприємства ТОВ «Ремсинтез» та виконаний порівняльний «SWOT-аналіз» його діяльності, яким було визнано найбільш потенційно перспективним для підприємства впровадження нових технологій та підрозділів для виконання сервісних (відновлювальних) робіт, що дало можливість більш детально визначити актуальні напрямки досліджень, встановити їх мету, визначити об'єкт й предмет, сформульовані задачі, які потребують подальшого вирішення в роботі.

Так, метою дослідження було визначено оцінку раціональних параметрів та ефективності процесу плазового напилення в залежності від характеристик дугового розряду плазмотрону, просторового положення й форми струменя плазми за ним та спільного впливу цих факторів на структуру покриття, що формується під дією магнітного поля.

В другому розділі «Дослідження особливостей формування плазових покриттів» розроблена фізична модель зміни просторового положення дуги та потоку плазми у плазмотроні під впливом зовнішнього магнітного поля (ЗМП) поперечної дії, на базі якої виконана оцінка впливу поперечного ЗМП на

параметри потоку плазми та дослідження ефективності та якості процесу плазмового напилення покриттів при дії поперечного ЗМП.

Проведеними дослідженнями встановлено, що вплив зовнішнього поперечного магнітного поля на вихідну частину факелу електричної дуги плазмотрона формує відхилення напрямку його витікання й змінює площу й форму напиленого покриття. Доведено, що зменшення співвідношення величини осьової складової швидкості потоку газу до її тангенційної складової в діапазоні $2,0 \dots 0,3$ формує зміщення факелу на $30^0 \dots 75^0$ та змінює параметри ділянки напилення. Визначено, що із підвищенням рівня магнітної індукції електромагніту в діапазоні $B = (20 \dots 80) \times 10^{-3} \text{ Тл}$ та струму дуги в діапазоні $I_d = 130 \dots 200 \text{ А}$, кут β відхилення плазмового факелу зростає, натомість як збільшення тиску утворюючого плазму газу в діапазоні $P_{nz} = 0,3 \dots 0,5 \text{ МПа}$, навпаки – знижує кут відхилення. Максимальне ж значення β визначається $\beta = 10 \dots 12^0$. Експериментальними дослідженнями також доведено, що встановлено, що зміна типу плазмоутворюючого газу із повітря на його суміші із $C_n H_m$ -компонентою (наприклад, пропан-бутаном) майже не змінює характер залежності кута відхилення плазмового струменя β_s від параметрів та режимів роботи плазмотрону.

Також доведено, що під дією ЗМП поперечної дії спостерігається як збільшення площ так й об'ємів ділянок напиленого плазмового покриття, що спричинене появою просторового зміщення високотемпературної зони газового потоку ближче до вихідного отвору сопла плазмотрону та потрапляння до нього більшої частини порошкового матеріалу. Результатом цього є збільшення площ ділянок напилення при різних формах організації дії магнітного поля (сталому та змінному) в середньому на $34\% \dots 55\%$ у поперечному перетині, на $30\% \dots 44\%$ - у плані та збільшення об'єму на $55\% \dots 75\%$. При цьому більші значення приросту площ та об'ємів ділянок напилення отримані при дії поперечного ЗМП з постійним напрямком дії.

Дослідженнями встановлено, що показники пористості напилених покриттів отриманих під впливом поперечного ЗМП постійної дії є кращими, за аналогічні, але сформовані полем із знакозмінною магнітною характеристикою.

Лабораторні дослідження також показали підвищення рівня зносостійкості плазмових покриттів отриманих в залежності від виду дії поперечного ЗМП (сталого або змінного) у 1,5...2,0 у порівнянні із традиційним плазмовим напиленням.

В третьому розділі «Підготовка поверхні деталі перед нанесення плазмових покриттів» наведена методика та режими обробки поверхонь деталей перед напиленням й досліджена міцність зчеплення напиленого плазмового покриття із поверхнею деталі при різних способах попередньої підготовки поверхні. Доведено, що підвищення якості зчеплення напилених плазмових покриттів з основою (сталь 45) в значній мірі залежить від попередньої підготовки її поверхні. Найбільшою ефективністю володіють плазмові покриття сформовані на поверхнях зразків попередньо оброблених металевим дробом. Крім цього, визнано що задля підвищення показників міцності напилених поверхонь доцільно застосовувати фінішну операцію - ціанування.

В якості загального висновку слід зазначити, що впровадження технології плазмового нанесення зносостійких покриттів під дією поперечного ЗМП у виробничий процес ТОВ «Ремсинтез», дозволить підвищити якість виготовлення деталей типу «вали», підвищити їх стійкість в умовах абразивного та інших видів зношення та розширить технологічні можливості підприємства, що потенційно дозволить залучити додаткові обсяги замовлень.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Офіційний сайт ТОВ «Ремсинтез» (м. Кропивницький) remsintez.com.ua/ua.
2. Д. Вердиш. Звіт із дослідницької практики «Дослідження раціональних параметрів нанесення газотермічних покриттів на поверхні валів у ТОВ «Ремсинтез» (м. Кропивницький)». – Кропивницький, ЦНТУ, кафедра ЕРМ, 2024. 16 с.
3. Ремонт автомобілів : навч. посіб. / В.Я. Чабанний та ін. Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2007. кн. 1. 392 с.
4. Технологія ремонту сільськогосподарської техніки : підручник / М.Власенко та ін. К.: Вища школа, 1992. 311 с.
5. Технічне обслуговування та ремонт сільськогосподарської техніки : підручник / П.В. Лауш та ін.; за ред. П.В. Лауша та І.Ф. Василенка. Кіровоград: ПОЛІМЕД-сервіс, 2007. кн.2. 444 с.
7. Ремонт автомобілів : навч. посіб. / В.Я. Чабанний та ін. Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2007. кн. 2. 348 с.
8. Офіційний сайт ТОВ «Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР» <http://www.plazer.com.ua/en/plazer-30-pl-w.html>
9. Технічна експлуатація та надійність автомобілів : Навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Є.Ю. Формальчик, М.С. Олісевич, О.Л. Мاستикаш, Р.А. Пеліш - Л. : Афіша, 2004. 492 с.
10. Маркович, С.І. Експлуатація та ремонт двигунів внутрішнього згоряння : навч. посіб. / С.І. Маркович, О.В. Бевз ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 334 с. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/11863>.
11. Експлуатація та обслуговування транспортних машин: Навч. посіб. для студ. / А.А. Кашканов, В.В. Біліченко; Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця, 2004. 136 с.
12. Основи матеріалознавства. Навчальний посібник / Високос С.М., Глушко Ю.Ю., Пеховка М.В., Сашко В.О., Терещенко Т.М. Автор-упорядковувач: Боброва Т.Б. – К.: Ресурсний центр ГУРТ, 2019. 104 с. <https://mon.gov.ua/storage/app/media/news/%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B8/2020/04/28/7materialoznavstvo.pdf>

13. Чумак М. Г. Матеріали та технологія машинобудування / М.Г. Чумак. – Київ: Либідь, 2000. 368 с.

14. Зварювання в автомобілебудуванні: металознавство та технології: навчальний посібник / Косенко В.А., Добровольський О.Г., Красовський А.П., Каліцький Л.С., Малишев В.В. – К.: Університет «Україна», 2018. 239 с. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Kosenko_2018_239.pdf

15. Гуменюк І.В. Обладнання та технології зварювальних робіт : навч. посіб. / І.В. Гуменюк. - К.: Грамота, 2014. 120 с. https://www.svpu-profi.lg.ua/pdf/library/gumenuk_oblad_ta_tehnolog.pdf

16. Особливості застосування різних методів зварювання. Електронний ресурс. <https://ua.lksteelpipe.com/news/the-welding-methods-of-aluminum-and-its-alloys-30818023.html>

17. Контроль якості зварювання. Т. 1. Неруйнівні методи контролю: навчальний посібник / Г. І. Камель, Ю. А. Гасило, П. С. Івченко, Р. Я. Романюк. — Кам'янське : ДДТУ, 2018. — 241 с. <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/1/27/1-27-b1.pdf>

18. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник для практичних робіт з охорони праці для студентів зварювальних спеціальностей / Укл. О.Г. Левченко. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Електронний ресурс. <http://surl.li/pefpc>

19. Методичні вказівки для виконання випускної кваліфікаційної роботи для здобувачів за освітньо-професійної програми «Автомобільний транспорт» другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 274 – «Автомобільний транспорт» денної та заочної форми навчання / уклад.: С.О. Магопєць, Ю.В. Кулєшков, О.В. Бєвз, М.В. Красота, Д.В. Голуб, А.С. Максимєнко; під заг. редакцією к.т.н., доц. Магопця С.О. - Кропивницький: ЦНТУ, 2022. 46 с.