

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка до дипломної роботи магістра

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»


Освітньо-професійна програма: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

на тему: «Технологія плазмового оплавлення та підвищенні абразивної
зносостійкості електрометалізаційних покриттів»

Шифр: МРТАМ 22.17129.000. ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група МТВАм -21-1  В.В. Лошак

Керівник  д.т.н., проф. О.В. Диха

До захисту допускаю:  Диха О.В.
Зав. кафедри ТАМ

1 12 2022 р.

Хмельницький, 2022 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»
Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»
Спеціалізація: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедрою Г.А.М.
Диха О.В.
" 15 " жовтня 2022 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТУ

Лошак Владислав Володимирович

1. Тема проекту:
«Технологія плазмового оплавлення та підвищенні абразивної зносостійкості електрометалізаційних покриттів»

керівник проекту: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 01 липня 2022р. № 83

2. Строк подання студентом проекту на кафедру: 15.12.2022 р.

3. Вихідні дані до проекту:

- 1) *Технічні умови на технологію електрометалізаційного нанесення захисних покриттів.*
- 2) *Річна програма ремонту деталей.*
- 3) *Матеріали переддипломної практики.*
- 4) *Результати літературного огляду і патентного пошуку.*

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

1. *Аналіз способів захисту машин від абразивного зносу*
2. *Аналіз теплових процесів в системі «покриття-основа»*
3. *Дослідження властивостей металізаційних покриттів, оплавлених плазмою*
4. *Розробка технології зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин*

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

6. Дата видачі завдання: 15 жовтня 2022р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	Аналіз способів захисту машин від абразивного зносу	1.11.2022	
2	Аналіз теплових процесів в системі «покриття-основа»	15.11.2022	
3	Дослідження властивостей металізаційних покриттів, оплавлених плазмою	1.12.2022	
4	Розробка технології зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин	5.12.2022	
5	Оформлення презентаційних матеріалів	15.12.2022	

Студент

 Лашак В.В.

Керівник роботи

 Диха О.В.

плазмо.
 одержан
 В п
 1. Анал
 джер
 парам
 2. Визнач
 зв'язок і
 системи F
 3. Розробка т
 підвищення
 сільськогосп

 Перелік к
 робочі органи ма

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 105 сторінок, кількість рисунків – 47, таблиць – 11, додатків – 2, кількість джерел згідно із переліком посилань – 76.

Студент гр. МТВАм-21-1 Лошак В.В.

Тема «Технологія плазмового оплавлення та підвищенні абразивної зносостійкості електromеталізаційних покриттів»

Дана магістерська дипломна робота спрямована на розробку технології плазмового оплавлення на підвищенні абразивної зносостійкості покриттів, одержаних дуговою металізацією.





В процесі виконання магістерської роботи вирішувались наступні задачі:

1. Аналіз теплових процесів в покритті під впливом висококонцентрованого джерела нагріву, стосовно плазмової обробки, з метою визначення параметрів режиму;
2. Визначення впливу плазмової обробки на характеристики структури та їх зв'язок із фізико-механічними та службовими властивостями покриттів системи Fe-C-Cr-Ti-Al;
3. Розробка технології плазмового оплавлення металізаційних покриттів для підвищення їх абразивної зносостійкості, стосовно робочих органів сільськогосподарської техніки, для продовження їх терміну служби.

Перелік ключових слів: електродугова металізація, оплавлення, робочі органи машин, теплові процеси, зносостійкість

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1.АНАЛІЗ СПОСОБІВ ЗАХИСТУ МАШИН ВІД АБРАЗИВНОГО ЗНОСУ.....	8
1.1.Знос та матеріали робочих органів.....	8
1.2. Методи нанесення зносостійких покриттів та їх подальшої модифікації.....	11
2.АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ «ПОКРИТТЯ_ОСНОВА».....	25
2.1.Вплив параметрів режиму плазмової обробки та властивостей покриття на поширення теплоти у композиції «покриття – основа».....	25
2.2. Аналіз структурних перетворень під час оплавлення металізаційного покриття на основі результатів моделювання.....	33
3.ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛІЗАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ, ОПЛАВЛЕНИХ ПЛАЗМОЮ.....	38
3.1.Матеріали для досліджень.....	38
3.2. Методи досліджень.....	41
3.3. Результати дослідження та їх аналіз.....	43
4.РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІІ ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН.....	65

МРТАМ 22.17129.000. ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Технологія плазмового оплавлення та підвищенні абразивної зносостійкості електрометалізаційних покриттів	Літ.	Аркуш	Аркушів
						4	105	
						ХНУ,		
						гр. МТВАМ-21-1		
								
			Диха					

4.1.Опис конструкції та зміцнюваного робочого органу.....	65
4.2.Розробка технології зміцнення.....	67
4.3.Експлуатаційні випробування зміцнених робочих органів грунтообробних машин.....	72
 ВИСНОВКИ.....	 79
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	81
Додатки.....	89

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Абразивне знос є одним з основних факторів, що обмежують ресурс роботи деталей, вузлів машин та обладнання різного призначення.

З метою підвищення абразивної зносостійкості застосовують різноманітні методи обробки робочої поверхні. Перспективним напрямом створення захисних покриттів є дугове напилення, але металізаційне покриття швидко руйнується під впливом абразиву, в результаті мікрорізання та відшарування його частинок з недостатньою когезійною міцністю.

Існує ряд способів зменшення чи усунення недоліків металізаційних покриттів. Найбільш привабливим з погляду техніко-економічних показників є подальша плазмова обробка.

Однак вплив плазмового поверхневого оплавлення на властивості напилених покриттів на основі заліза та процес поширення тепла в композиції «покриття – основа» не вивчені, що ускладнює застосування цієї технології. Для визначення впливу параметрів режиму плазмової обробки на властивості напиленого покриття після оплавлення зручно скористатися таким інструментом, як математичне моделювання, що дозволяє визначити розподіл температур композиції, термічний цикл обробки і швидкості нагрівання та охолодження матеріалу.

До деталей схильним до інтенсивного зносу в процесі експлуатації, зокрема, належать робочі органи ґрунтообробних машин. На інтенсивність зношування таких знарядь впливають однорідність, вологість і щільність ґрунту, форма та швидкість руху робочих органів, а також матеріали з яких вони виготовлені.

Високі швидкості зношування лемешів та потреба в них колгоспів, а також простота їх монтажу/демонтажу на плуг роблять їх ідеальним об'єктом для проведення натурних випробувань.

Мета роботи полягає у розробці технології плазмового оплавлення на

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

підвищенні абразивної зносостійкості покриттів, одержаних дуговою металізацією.

Для досягнення у процесі вирішувались наступні **завдання**:

- Проаналізувати теплові процеси в покритті під впливом висококонцентрованого джерела нагріву, стосовно плазмової обробки, з метою визначення параметрів режиму;
- визначити вплив плазмової обробки на характеристики структури та їх зв'язок із фізико-механічними та службовими властивостями покриттів системи Fe-C-Cr-Ti-Al;
- розробити технологію плазмового оплавлення металізаційних покриттів для підвищення їх абразивної зносостійкості, стосовно робочих органів сільськогосподарської техніки, для продовження їх терміну служби.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ЗАХИСТУ МАШИН ВІД АБРАЗИВНОГО ЗНОСУ

1.1. Знос та матеріали робочих органів

Зношуванням називається процес відділення матеріалу з поверхні твердого тіла та (або) збільшення його залишкової деформації при терті, що проявляється у поступовій зміні розмірів та (або) форми тіла. Зношування робочих органів машин і механізмів може бути викликане впливом агресивних середовищ, великим перепадом температур і тисків, високими вібраційними навантаженнями та їх різними комбінаціями.

Механізм руйнування робочої поверхні контактуючих тіл залежить від природи взаємодіючих тіл та умов тертя. Розрізняють такі елементарні види руйнувань [1]:

- дряпання;
- мікрорізання;
- відшаровування;
- фарбування (піттинг);
- глибинне виривання;
- перенесення матеріалу.

Залежно від умов роботи види зношування можна класифікувати за характером на поверхню тертя наступним чином [2, 3]:

- механічне - абразивне, гідроабразивне, гідроерозійне, кавітаційне, втомне, при фреттингу, при заїданні;
- корозійно-механічне - окисне, корозійнерозтріскування, при фреттинг-корозії;
- під впливом електричного струму.

У більшості вузлів та деталей машин реалізується механічне зношування робочої поверхні. З цим пов'язано різноманітність схем

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

механічного навантаження, у яких відбувається експлуатація деталі.

Для багатьох типових умов роботи деталей машин найпоширенішим видом зношування є абразивне [1]. Абразивного зношування піддаються деталі сільськогосподарських, дорожньо-будівельних, гірських, транспортних машин і транспортуючих пристроїв, вузли шасі літаків, металорізальних верстатів, робочі колеса та направляючі апарати гідравлічних турбін, лопатки газових турбін, турбіни та насоси землеснарядів, бурильне обладнання і т.п.

Абразивним називається зношування поверхні деталі під впливом ріжучої, деформуючої або дряпаючої дії твердих частинок, що володіють різною формою, розмірами та твердістю. В якості таких частинок можуть виступати пісок, електрокорунд, окалина або тверді структурні складові однієї зі сполучених поверхонь.

Руйнування поверхні може виникати внаслідок зняття стружки або багатоактної взаємодії поверхні деталі з абразивними частинками.

Умовам інтенсивного абразивного зносу відповідають робочі органи ґрунтообробних машин, оскільки в процесі експлуатації вони знаходяться у безпосередньому контакті з твердими частинками (HV 8–11 ГПа), що містяться у ґрунті. Найшвидше при оранку, культивуванні та інших видах обробки ґрунту зношуються та затуплюються ріжучі частини робочих органів сільськогосподарських машин такі як: лапи культиваторів, лемеша, ножі фрез, полиці, диски борін, польові дошки та ін. Це призводить до погіршення якості обробки ґрунту, зниження продуктивності праці та збільшення витрати палива [4].

Зношування робочих органів ґрунтообробних машин характеризується незначною пластичною деформацією поверхневих шарів металу, хімічною взаємодією з різними елементами зовнішнього середовища (волога, гумус, кисень, вуглекислий газ), утворенням та руйнуванням плівок

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

оксидів (вторинних структур), товщина яких становить 0,01–0,05 мкм [5].

Залежно від механічного складу ґрунту та його вологості робочі органи ґрунтообробних машин зношуються за товщиною, шириною, довжиною, затупляються, згинаються та ламаються [6]. Тиск ґрунту на леза робочих органів є динамічним і варіюється в діапазоні 3-16 кг/см² [7]. З підвищенням вологості ґрунту, його дрібних фракцій, діаметром 0,25–1,00 мм, величина зношування лемешних робочих органів збільшується.

В даний час серійні робочі органи для ґрунтообробних машин виготовляють із сталей 65Г, 45 та Л-53, які в загартованому стані мають твердість (37–43 HRC) та мають задовільні показники відносного подовження ($\delta = 6,5\text{--}7,2\%$), але невелика межа міцності ($\sigma_B = 880\text{--}1080$ МПа). Однак, застосовувані матеріали не забезпечують достатньої стійкості робочих органів ґрунтообробних машин, що говорить про актуальність застосування додаткової обробки або створення захисних покриттів, здатних протистояти важким умовам експлуатації.

Найбільша швидкість зносу спостерігається на піщаних ґрунтах з великою кількістю кам'янистих включень. Як показують результати численних випробувань лемешів на довговічність в умовах пісків, від 15 до 50% їх вибраковують від вигину та поломки шкарпетки, не досягнувши граничного стану зносу. Інтенсивність зношування на глинистих ґрунтах у 6–7 разів менша, ніж на піщаних та супіщаних. На чорноземних ґрунтах найбільш інтенсивно зношується ріжуча кромка леза лемеша. В результаті цього лезо затуплюється і набуває округлої форми [8]. Середнє напрацювання до одного лемеша становить 5,5-6,0 га [9], якої вони досягають в середньому за 2-4 дні. Таким чином використання розроблених покриттів стосовно робочих органів ґрунтообробних машин дозволяє в короткі терміни визначити їх ефективність на практиці.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1.2. Методи нанесення зносостійких покриттів та їх подальшої модифікації.

Залежно від умов роботи деталей застосовують різні види сталей, як правило, високолегованих, що суттєво ускладнює технологічні процеси виготовлення та призводить до збільшення витрат на готовий виріб [11, 12].

Однією з найпоширеніших технологічних операцій є термічна обробка, і вона використовується для зміцнення деталей загалом. При цьому твердість металу можна отримати в межах 40-46 HRC для сталі 45 і до 58-65 HRC для сталі 65Г та легованих сталей. Але зносостійкість таких робочих органів нижча порівняно з аналогічними деталями, виготовленими зі спеціальних матеріалів. З іншого боку, на суглинистих ґрунтах немає самозаточування [13].

Сутність ефекту самозаточування полягає у вибіркового зносі неоднорідного за перерізом леза, при якому зберігається необхідна форма та ріжучі властивості робочого органу [14]. Реалізації ефекту самозаточування сприяє двошарова будова робочого органу, що складається з шару, що несе, твердістю 37-42 HRC і твердого шару 52-60 HRC.

Знаряддя, що пройшли відповідну термообробку, мають високу зносостійкість при одночасній міцності на злам і скол і добре працюють в абразивних ґрунтах з кам'янистими компонентами. Так завдяки поверхневому загартуванню на глибину до 2 мм лемеш має твердість у поверхневому шарі 55-60 HRC, що значно підвищує його зносостійкість.

У працях Ю.Д. Щіцина та Д.С. Белініна доведено високу ефективність плазмового поверхневого зміцнення на струмі зворотної полярності, за рахунок розширення оброблюваної зони та підвищеного тепловкладання при порівняно не високих значеннях потужності стиснутої дуги [15]. Однак технології плазмового поверхневого зміцнення не знайшли широкого застосування для зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин, тому

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

що високе тепловкладання призводить до значних деформацій.

З метою підвищення терміну служби та забезпечення ефекту самозаточування виробляються біметалічні лемеші трапецієподібної форми з двошаровою катаною лезовою частиною зі сталі Х6Ф1 (нижній шар) та Л-53 (верхній шар) [16]. Такі органи мають підвищений термін служби, проте їх широке впровадження утруднюється у зв'язку з високою вартістю виготовлення.

Для зміцнення поверхні та підвищення ресурсу деталей використовуються різні методи нанесення зносостійких покриттів. Одним із найбільш високопродуктивних та ефективних способів отримання металевих покриттів є наплавлення. У процесі наплавлення поверхневий шар оброблюваної деталі, а також матеріал, що наплавляється, під дією тепла зовнішнього джерела (дуга, газокисневе полум'я, лазерне випромінювання, плазма) розплавляється на деяку глибину. Розплавлені метали основи та покриття утворюють загальну рідку ванну, таким чином, з'єднання відбувається у рідкій фазі.

Рівень зносостійкості наплавочних матеріалів більшою мірою залежить від хімічного складу та твердості сплаву. Однак, не всі сплави, що мають високу твердість, показують високу абразивну зносостійкість [17, 18]. Доведено, що зносостійкість залежить в першу чергу від структурних факторів отриманих сплавів, таких як: кристалічна структура твердого розчину, ступінь дисперсності та природа фаз, що утворюються. Тому з метою підвищення зміцнювальної здатності необхідно легувати наплавні матеріали елементами, що забезпечують утворення дрібнодисперсних фаз і перешкоджають розміцненню твердого розчину. У таблиці 1.1 представлені основні наплавні електроди, що використовуються для підвищення зносостійкості

Для зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин запропоновано велику кількість методів наплавлення: точкове наплавлення порошковим

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

дротом [19]; плазмове наплавлення порошкових матеріалів на основі заліза та нікелю [20, 21]; спосіб індукційної наплавки [22, 23].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад електродів для зносостійкого наплавлення

№ п/п	Марка	Хімічний склад, %								Твердість, HRC
		З	Cr	Si	Mn	Ni	B	Mo	W	
1	ЦН-12М	0,1	16,3	4,1	4,0	7,9	-	5,7	-	47
2	ОЗН-6	1,0	4,4	3,7	2,6	-	0,9	-	-	48
3	ЗЗШ-3	0,4	9,9	1,9	0,5	-	-	-	-	50
4	Т-590	3,2	25,0	2,2	1,2	-	1,0	-	-	57
5	ОЗІ-3	0,8	3,6	0,4	0,5	-	-	4,0	1,4	50
6	ОЗН-7М	0,7	4,1	1,4	0,4	2,0	0,5	-	-	51
7	ЕН-60М	0,8	2,7	1,0	0,9	-	-	0,9	-	53

Метод дугового наплавлення відрізняється простотою реалізації та низькою вартістю, але при цьому високе тепловкладання в основний матеріал може призвести до значних деформацій виробу.

Найбільшого поширення набули лемеша після гарту або з наплавленням зносостійким сплавом – Сормайт №1 (таблиця 1.2) [1]. Однак, багато дослідників продовжують пошук матеріалів і технологій, здатних, за низьких витрат, значно продовжити термін служби робочих органів ґрунтообробних машин.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад та твердість сплаву Сормайт №1

Зміст основних елементів, %						Твердість HRC
Fe	Cr	Mn	Ni	Si	C	
зуп.	25,0-31,0	1,5	3,0-5,0	2,8-4,2	2,5-3,0	49-54

Особливе місце серед методів обробки поверхні займають методи газотермічного напилення (ГТН). Напилення є процесом нанесення покриття на поверхню деталі за допомогою високотемпературного швидкісного струменя, що містить частинки порошку або краплі

розплавленого напилюваного матеріалу, що осаджуються на поверхні основного металу при ударному зіткненні з його поверхнею. Для забезпечення міцних міжатомних зв'язків між частинками, що контактують, при формуванні покриття, необхідний їх нагрівання і розгін до високих швидкостей.

Методи ГТН характеризуються такими перевагами [24]:

- незначне нагрівання поверхні, що напилюється;
- висока продуктивність;
- одержувані покриття завтовшки від 0,01 до 10 і більше мм;
- широкий діапазон складу покриття.

Для напилення можуть бути використані порошки молібдену, нікелю, сплави, що самофлюсуються, та їх суміші з порошками карбідів і оксидів з високою твердістю, керамічні матеріали, включаючи оксид алюмінію та оксид хрому [25, 26]

Існуючі технології ГТН, залежно від джерела теплової енергії, що застосовується, можна розділити на два основні види: газополум'яне напилення, при якому використовується теплота, що виділяється при згорянні вуглеводнів, і способи напилення, засновані на використанні теплоти, що виділяється при горінні дуги (дугова металізація і плазмове напіт) [25, 26].

Результати досліджень проведених М.А. Білоцерковським, М.А. Харламовим та Ю.С. Коробовим [27–29] показали, що з погляду техніко-економічних показників доцільним є метод дугової металізації (ДМ) (таблиця 1.2).

При ДМ плавлення дротів, що розпилюються, здійснюється високоамперною дугою, що горить на її торцях. Для диспергування розплавленого металу використовують швидкісний потік стисненого газу. Теплота, що виділяється в активних плямах, практично повністю

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

витрачається на плавлення електродного дроту (60-70%), а частина теплоти дуги, що залишилася, поглинається навколишнім середовищем і потоком транспортуючого газу. Таким чином, ефективний ККД нагрівання при ДМ у 7–10 разів більший, ніж для інших способів ГТН, що зумовлює високу продуктивність (до 18 кг/год). Обладнання ДМ, що застосовується, просто в обслуговуванні, а значить, не вимагає залучення висококваліфікованого персоналу. Крім того, використовувані при ДМ як матеріали дроту в 2-3 рази дешевше порошків, що використовуються при інших способах напилення. Комбінація переваг ДМ у порівнянні з іншими методами напилення призводить до зниження витрат на одержання покриттів у 3-10 разів [30].

Таблиця 1.2 - Порівняння показників ефективності для методів ГТН [27-29]

Метод напилення	Ефективний ККД нагрівання, %	Продуктивність, кг/год	Відносна вартість
Газополум'яне (ДП)	10	7	3
Газополум'яне надзвукове (ГПС)	60	25	5
Плазмове	12	5	5
Дугова металізація (ДМ)	85	16	1

Як матеріали при ДМ застосовуються різні види дротів. Спеціалізовані марки дротів для напилення в даний час випускаються в обмеженій кількості. В основному для цих цілей використовуються зварювальні дроти за ГОСТ 2246-70 або наплавочні дроти за ГОСТ 10543-98 (таблиця 1.3) [26]. Для отримання зносостійких покриттів використовують суцільні дроти зі сталей мартенситного класу (40X13), високовуглецевих (У9, 65Г), легованих (ШХ15) [25]. Однак твердість таких покриттів знижується внаслідок інтенсивного вигорання

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

легуючих елементів при напиленні, зокрема вуглецю.

Застосування як розпилюваного матеріалу порошкових дротів (ПП) дозволяє в значних межах варіювати систему легування одержуваних покриттів шляхом додавання в шихту необхідних елементів, тим самим, надаючи покриттям ті чи інші експлуатаційні характеристики [31]. Матеріал наповнювача порошкового дроту може бути різним [32]. Залежно від цілей того чи іншого технологічного процесу як наповнювач можуть використовуватися: метали та їх сплави, рідкісноземельні метали, оксиди, бориди, карбіди і т.п.

Таблиця 1.3 – Хімічний склад деяких дротів для зносостійкого наплавлення за ГОСТ 10543–98

Марка	Хімічний склад, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Др.
Вуглецева								
НП-45	0,45	0,5-0,8	0,25	0,25	≥0,30	0,04	0,035	-
НП-50	0,50	Те саме						-
НП-85	0,85	Те саме						-
Легована								
НП-65Г	0,65	0,9-1,2	0,25	0,3	0,3	0,035	0,035	-
НП-30ХГСА	0,30	0,8-1,1	0,9-1,2	0,8-1,1	0,4	0,025	0,025	-
НП-40Х2Г2М	0,40	1,8-2,3	0,4-0,7	1,8-2,3	0,4	0,035	0,035	0,8-1,2 Мо
Високолегована								
НП-40Х13	0,40	0,8	0,8	10-13	0,6	0,03	0,03	0,2 Ті
НП-45Х2В8Г	0,45	1,2	0,5	2,5	0,6	0,03	0,03	8,5 W 0,4 V 0,5 Ті

Великий внесок у розробку та впровадження електродугових покриттів із ПП зробили фахівці з Фізико-механічного інституту ім. Г.В.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Карпенка НАН України [33]. Покриття з розроблених ПП марки ФМІ системи Fe-Cr-

В-Al широко застосовуються для відновлення та захисту від абразивного та газоабразивного зносу.

Для нанесення зносостійких покриттів широкого поширення набули економнолеговані ПП марки ППМ-6 та 8 системи легування Fe-C-Cr-Ti-Al, розроблені в Уральському інституті зварювання [34, 35]. Зносостійкість покриттів, напилених даним дротом, в 1,5-2 рази вище, ніж для покриттів із суцільного дроту ферито-мартенситного класу 20X13, що обумовлюється наявністю в отриманих покриттях аустенітно-мартенситної матриці з карбідним зміцненням [3].

Основними недоліками дугового напилення є небезпека перегріву і окислення матеріалу, що напилюється. Велика кількість теплоти, що виділяється при горінні дуги, призводить до значного вигорання елементів, що легують, що входять до складу розпилюваного матеріалу і насичення його газами з атмосфери. Крім того, обладнання ДМ відрізняється широким кутом розпилу – до 70°, та низьким коефіцієнтом використання матеріалу – 0,6 [29].

На дистанції напилення частинки, нагріті до високих температур, активно взаємодіють із навколишнім середовищем та окислюються [39]. Розплавлені або розігріті до пластичного стану частинки розплющуються по поверхні, зачепляючись попередньо по її нерівностях і потім контактуючи між собою, при цьому утворена плівка оксидна потрапляє в покриття. Вона сильно впливає на властивості покриття: може перешкоджати дифузії частинок, впливати на міцність зчеплення і твердість покриття. Внаслідок малого розміру або низької швидкості окремі частинки встигають охолонути на момент удару об підкладку нижче точки плавлення, які кінетичної енергії недостатньо для деформування. Це призводить до того, що вони залишаються у покритті у глобулярній формі. В інтервалі між

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

нанесенням окремих шарів на поверхні останнього шару відбувається адсорбція газів і відкладення пилоподібних фракцій матеріалу, що розпилюється, або його оксидів. Крім того, через високу швидкість розтікання та кристалізації

частинок при ударі в зоні контакту з поверхнею раніше нанесених частинок залишаються порожнини та дефекти. Це призводить до появи мікропорожнеч на стиках частинок, а оскільки покриття формується в атмосфері, мікропустоти наповнюються газом. Частина перегрітих вище точки плавлення частинок може випаровуватись і осаджуватися у паровій фазі. Таким чином, умови формування газотермічних покриттів зумовлюють ряд, властивих для них, дефектів, до яких можна віднести: відшарування або здуття покриття внаслідок недостатньої адгезії до основного металу, тріщини, пористість та неоднорідність структури [40, 41].

Пористість відноситься до найважливіших показників якості покриттів [42]. Висока пористість негативно відбивається на адгезійній та когезійній міцності покриттів, корозійній та зносостійкості, газопроникності та інших властивостях. Так, наприклад, в умовах абразивного зносу та тертя ковзання без мастила спостерігається інтенсивна втрата маси покриття внаслідок мікрорізання та когезійного відриву [43]. Руйнування протікає внаслідок відриву окремих частинок та конгломерованих ділянок покриття, у зонах покриття з ослабленою когезійною міцністю між частинками покриття. Тверді частки абразиву та продуктів зношування впроваджуються в несплошності напиленого покриття, руйнуючи його за механізмом мікрорізання [44]. Таким чином, значну роль у процесі руйнування покриття відіграє однорідність його структури,

У деяких випадках, наприклад, на деталях вузлів тертя ковзання з мастилом, пористість може бути корисною, оскільки вона може послужити для накопичення масла. З іншого боку, пористість може викликати процеси корозії на межі метал-покриття [46], коли агресивні гази або рідини по

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

відкритих порах досягають основного металу. Отже, покриття, що працює без мастила, з абразивними частинками або в агресивних середовищах, повинно мати мінімальну пористість.

Крім пористості, важливу роль у механічних властивостях покриттів відіграє міцність зчеплення з основою (адгезія). Недостатня адгезійна міцність покриттів обумовлюється низкою факторів [25, 47]:

- утворення міцних зв'язків частинок покриття з підкладкою не по всій поверхні контакту, а лише на окремих ділянках;
- міцність у плямі приварювання нижче міцності компактного матеріалу, що обумовлюється макро-і мікроскопічною дефектністю сполуки, що утворилася;
- недостатня дифузія покриття в основний метал внаслідок короткого часу їхньої взаємодії в нагрітому стані (10-4-10-7 сек);
- велика величина залишкових напруг, що виникають у напиленому матеріалі, внаслідок особливостей його формування.

Якщо значення зовнішнього навантаження або залишкової напруги перевищать значення міцності адгезійної покриття, може відбутися його відшарування.

Таким чином, зносостійкість газотермічних покриттів багато в чому залежить від їхньої мікроструктури, пористості, когезійної та адгезійної міцності.

З метою зниження недоліків покриття та технології ДМ застосовується обладнання активованої дугової металізації (АДМ), відмінність якого полягає в тому, що як транспортуючий газ у ньому використовуються продукти згоряння повітряно-пропанової суміші. Порівняння вихідних характеристик процесів ДМ та АДМ показали, що окислення крапель, кут розпилу та пористість були знижені більш ніж у 2 рази, а коефіцієнт використання матеріалу та швидкість частинок зросли в 1,4 та 3 рази відповідно [29, 30]. Незважаючи на значне поліпшення

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

технологічних параметрів напилення, покриття, що отримуються АДМ, мають адгезію до 45 МПа і пористість до 3%. Цього може бути замало ефективного протистояння покриття ударно-абразивному зносу.

Підвищення властивостей напилених покриттів вимагає модернізації самих методів напилення та оптимізації їх режимів або застосування додаткових технологічних операцій [48]. Для ущільнення покриття та підвищення міцності зчеплення між шарами та основним металом можуть застосовуватись різні методи: місцеве оплавлення покриття концентрованими потоками енергії, пластичне деформування, термомеханічна обробка, фарбування спеціальними лаками, високотемпературні хімічні процеси [48, 49] та ін.

Пластичне деформування - це один з методів подальшої обробки покриттів, який полягає в обкатці кулькою або роликком поверхні покриття, що виробляється як у гарячому, так і холодному стані. Суть даного методу полягає в пластичній деформації поверхневого шару виробу, під дією обробного інструменту, що викликає його ущільнення, заповнення пір і структурні зміни в кристалічній решітці, що підвищують зносостійкість і створюють залишкові напруги, що стискають, що підвищують опір втоми [50].

Недоліком обробки покриттів шляхом поверхневої обкатки є неможливість отримання високої щільності покриття, ймовірність його розтріскування при холодній деформації та відсутність підвищення адгезійної міцності [51].

З метою підвищення густини покриття проводиться також обробка герметиками. Просочення газотермічних покриттів проводиться зануренням, розпиленням або наноситься пензлем. Мета ущільнювального просочування герметиками полягає у закритті чи заповненні всіх відкритих структурних дефектів, що з поверхнею покриття [49, 52–55].

Однак, неправильний вибір герметика може не принести бажаного

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

результату, а в деяких випадках навіть прискорити руйнування покриття при експлуатації [48].

З метою подальшої модифікації покриття може бути використана електромеханічна обробка (ЕМО), що реалізується при пропусканні електричного струму великої щільності (108-109 А/м²) і низької напруги (2-6 В) через зону контакту деталі та деформуючого ролика. В результаті виділення великої кількості теплоти в зоні контакту відбувається високошвидкісне нагрівання локального мікрооб'єму поверхні з одночасним пластичним деформуванням. Внаслідок швидкого охолодження ділянок поверхневого шару, що нагріваються, за рахунок відведення тепла вглиб основного металу відбувається миттєве загартування поверхні [56]. До недоліків способу можна віднести неможливість підвищення адгезії, низьку продуктивність та високу вартість обладнання [51].

Проведені дослідження показують, що супутня об'ємна та газополум'яна термообробка газотермічних покриттів дозволяє суттєво змінювати структуру нанесених покриттів, знижуючи пористість та підвищуючи їх твердість та міцність зчеплення з основою. Термообробка покращує корозійну стійкість системи основа-покриття, за рахунок зниження кількості неоднорідностей напиленого покриття, таких як пористість і мікротріщини між шарами, які є шляхами для проникнення корозійного середовища до основи [57].

Однак, незважаючи на значне покращення характеристик покриття, об'ємна та газополум'яна термообробка мають ряд недоліків. Сильна теплова дія на основу при нагріванні в печі призводить до її зміцнення, термічних деформацій та великих витрат енергії [58]. Якість газополум'яної термообробки багато в чому залежить від досвіду оператора. Тому пошук ефективніших методів обробки напилених покриттів є актуальним науково-технічним завданням.

Основною відмінною особливістю методів поверхневого зміцнення

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

висококонцентрованими джерелами нагріву є можливість отримання швидкостей нагріву та охолодження матеріалів, що на кілька порядків перевищують значення, характерні для традиційних методів зміцнення (пічного гарту, гарту ТВЧ, газополум'яного гарту та ін), що сприяє отриманню зміцнених шарів з недосяжним раніше рівнем експлуатаційних властивостей.

Висококонцентровані джерела енергії (лазерний та електронний промені) мають значний ступінь локалізації теплового впливу на підкладку та забезпечують високі швидкості кристалізації розплавленого металу. Однак низький коефіцієнт перетворення енергії променя на теплову, складність і мала продуктивність процесу вимагають більш глибокого вивчення можливостей електронно-променевої обробки. Тому для обробки напилених покриттів найбільшого поширення в даний час набули методи лазерної обробки [46, 58–63].

Під час лазерної обробки енергетична ефективність перенесення енергії від сфокусованого променя до матеріалу, насамперед, залежить від оптичних та теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу. Інші фактори, які визначають ефективність лазерної обробки, так звані параметри лазерного променя, включають: інтенсивність лазерного випромінювання, розподіл енергії променя, а також тривалість роботи. Енергія фотонів лазерного променя поглинається вільними носіями у зоні провідності металеві матриці. Кінетична енергія електронів, що виникла в результаті взаємодії з фотоном, передається кристалічним ґратам, викликаючи збільшення її внутрішньої енергії.

Під впливом лазерної обробки відбувається оплавлення покриття, що призводить до зниження пористості [46, 59].

Для збільшення міцності зчеплення покриття з підкладкою при лазерній обробці температура межі «покриття – основа» повинна досягати температури плавлення підкладки. У разі зміцнення матеріалу покриття

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

температура його поверхні доводиться до температури плавлення, а температура кордону не повинна досягати температури плавлення підкладки [60].

Таким чином, використання лазерів для супутньої обробки напилених покриттів може бути вирішенням багатьох проблем: збільшення адгезії, створення корозійно-і зносостійких шарів на поверхні покриттів, зниження газопроникності шляхом заплавлення поверхневої пористості. Проте досі широке впровадження лазерних процесів у виробництво стримується [64]. Основні причини цього – висока вартість обладнання і експлуатаційних витрат, відсутність висококваліфікованих робітників, здатних обслуговувати технологічні комплекси, низька надійність технологічних комплексів під час експлуатації, використання лише для великосерійних виробництв, неможливість роботи у польових умовах.

На відміну від перерахованих вище процесів, технологія та обладнання для плазмової поверхневої обробки відрізняється простотою в експлуатації, низькою вартістю, високою продуктивністю, успішно розвивається останніми роками та знаходить все більше застосування в різних галузях промисловості. Плазмові джерела нагріву мають наступні переваги [65, 66]:

- висока стабільність та стійкість стиснутої дуги;
- високий ефективний ККД нагріву (80%)
- потужність (102–105 Вт) та щільність потужності ($5 \cdot 10^2$ – 10^6 Вт/см²) можна порівняти з електронним та лазерним променями;
- гнучкість регулювання технологічних характеристик

Незважаючи на всі переваги плазмового джерела нагріву над іншими висококонцентрованими джерелами, їх використання для подальшої обробки газотермічних покриттів досліджено тільки для сплавів, що самофлюсуються на основі Ni, так як вони мають низьку температуру

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

плавлення (1420 °С), що полегшує їх подальше оплавлення, при слабкому тепловому впливі на основу [58, 67]. Однак такі сплави мають високу вартість, у зв'язку з чим актуальними стають завдання розробки технології та дослідження процесів плазмового подальшого оплавлення покриттів, отриманих методом дугової металізації з економнолегованих сплавів, температура плавлення яких відповідає металам групи заліза, близько 1800 К.

Неоднорідності структури та хімічного складу газотермічних покриттів обумовлюють значну зміну теплофізичних характеристик покриття, що ускладнює теплообмін із підкладкою. Високий градієнт температур на межі покриття – підкладка може призвести до відшарування покриття. За даними [60], підвищення міцності зчеплення покриття з основою, необхідно забезпечити оплавлення його поверхні. Таким чином, необхідно знати положення фронту плавлення композиції, залежно від параметрів режиму плазмової обробки. Раціональним методом визначення параметрів режиму в даному випадку є побудова математичної моделі розподілу температур у композиційному матеріалі від впливу концентрованого джерела нагріву.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

2.АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ «ПОКРИТТЯ_ОСНОВА»

2.1.Вплив параметрів режиму плазмової обробки та властивостей покриття на поширення теплоти у композиції «покриття – основа»

При розрахунках було прийнято такі геометричні параметри композиційного матеріалу:

- товщина основи: 10 мм;
- товщина покриття: 1; 1,5; 2мм.

Як матеріал для нанесення покриття були обрані економно леговані ПП марки ППМ-6 і ППМ-8 (таблиця 2.1), що широко застосовуються для нанесення зносостійких покриттів.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад використовуваних ПП

Марка ПП	Масова частка елементів, %				
	З	Cr	Ti	Al	Fe
ППМ-6	1,5	0,8	2,1	0,9	осн.
ППМ-8	0,8	22,5	2,1	2,1	осн.

Для визначення хімічного складу покриття з урахуванням вигорання елементів необхідно знати їх коефіцієнти переходу в метал покриття при активованій дуговій металізації. За даними [95], коефіцієнти переходу такі: Al - 0,8; Cr - 0,9; Ti - 0,6; C - 0,5. Хімічний склад покриттів, розрахований з урахуванням наведених даних, представлений у таблиці

2.2. Вважали, що пористість напилених покриттів становить 2,5 % [30].

Таблиця 2.2 - Розрахунковий хімічний склад покриттів

Марка	З	Cr	Ti	Al	Fe
ППМ-6	0,75	7,20	1,20	0,80	осн.
ППМ-8	0,40	19,80	1,20	1,60	осн.

Прийmemo, що частка участі оксидних прошарків у покритті становить 10

%. У таблиці 2.3 представлені значення теплофізичних характеристик оксидів, що утворюються при напиленні ПП, що розглядаються, а також їх частка участі в шлаку. Розрахунок теплофізичних характеристик покриття здійснимо за адитивною залежністю.

Таблиця 2.3 - Теплофізичні характеристики та частка участі оксидів у шлаку

Характеристика	FeO	Cr2O3	TiO2	Al2O3
λ , Вт/м·°С	7	10	12	5
z , Вт/кг·°С	766	781	1051	794
ρ , кг/м ³	5750	5210	3970	4260
частка V, %	8	6	11	75

Як матеріал основи обрана середньовуглецева сталь 40. Теплофізичні характеристики покриття, з урахуванням його пористості, вигорання легуючих елементів і наявності оксидних прошарків, розраховані за відомими формулами, а також довідкові дані характеристик для основи представлені в таблиці 2.

Таблиця 2.4 - Теплофізичні характеристики покриттів та основи

Матеріал	λ , Вт/м·°С	z , Вт/кг·°С	ρ , кг/м ³	T_n , °С	$T_{нар}$, °С
Сталь 40	34	481	7850	1510	2735
ППМ-6	23,2	682	7115	1401	
ППМ-8	20,1	669	7115	1436	

Результати попередніх розрахунків показали, що істотну роль теплопровідність напиленого покриття надає пористість (рисунок 2.3). Підвищення пористості значно знижує теплопровідність покриття, що зменшує здатність проплавляти. Так, наприклад, збільшення пористості покриття на 1% призводить до зниження теплопровідності покриття на 6%.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

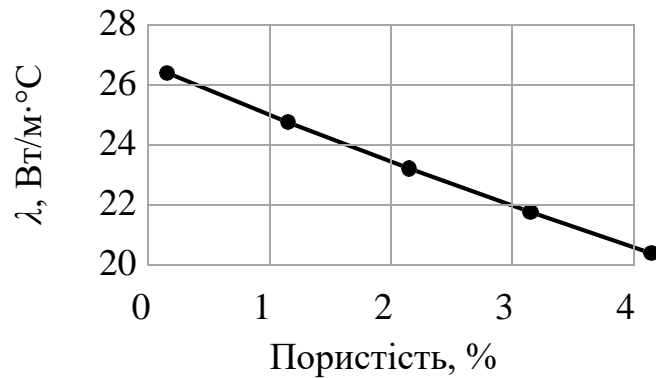


Рисунок 2.1 – Вплив пористості на теплопровідність покриття

Крім пористості на теплопровідність покриття впливає також його хімічний склад. Найбільший вплив на теплопровідність має вміст вуглецю (рисунок 2.2), кожен відсоток якого призводить до зниженню теплопровідності на 7,5 %, підвищення вмісту Cr та Ti на 1 % знижує теплопровідність на 2 %, а Al на 3,5 %.

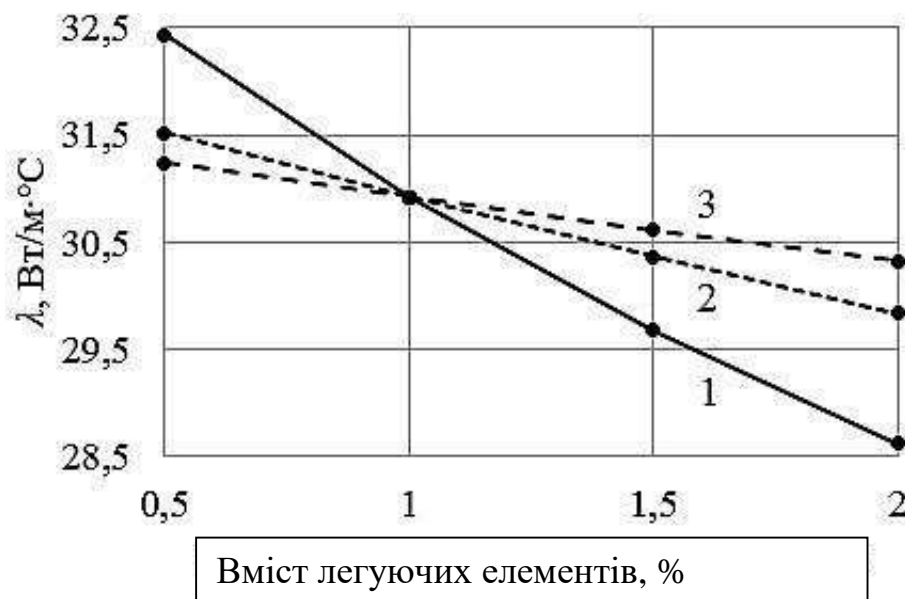


Рисунок 2.2 – Вплив елементів на теплопровідність покриття: 1 – C; 2 – Al; 3 – Ti, Cr легуючих

В результаті отримали розподіл ізотерм у площині YOZ, розташованої в центрі джерела нагріву (рисунок 2.3). Видно, що температури в композиції

розподіляються нерівномірно, що пов'язано з великою різницею теплопровідності покриття і підкладки. Висока теплопровідність підкладки зумовлює велику швидкість розповсюдження температури в порівнянні з покриттям. Найбільш важливим параметром дугового зварювання є її погонна енергія $q_p = 0,24 \cdot I \cdot U \cdot \eta / V$, де η – ККД плазмотрона 80 % . Вплив погонної енергії плазмової обробки на глибину проплавлення покриття описується кривими, що представлені на рисунку 2.6. Ізолінії 1 відповідає значення погонної енергії, при якому оплавлення покриття відбувається не на всю глибину. Ізолію 2 показує режим, при якому відбувається повне оплавлення покриття без плавлення основи. При цьому, зона оплавлення проходить по межі розділу «покриття – основа», що пов'язано з більшою теплопровідністю та температурою плавлення основи в порівнянні з покриттям, отже, для розплавлення основи необхідно витратити більше енергії. Режиму повного проплавлення покриття та основи відповідає ізолінію 3. У моделі прийнято стрибкоподібну зміну теплофізичних характеристик на межі між покриттям та основою. Цим пояснюється характер зміни ізолінії 3 на кордоні. В реальності на межі між покриттям і основою буде перехідна ділянка з теплофізичними характеристиками, що змінюються. Точність представлених розрахунків за моделлю ми оцінимо при їх порівнянні з геометричними параметрами зони оплавлення, отриманими в ході натурального експерименту.

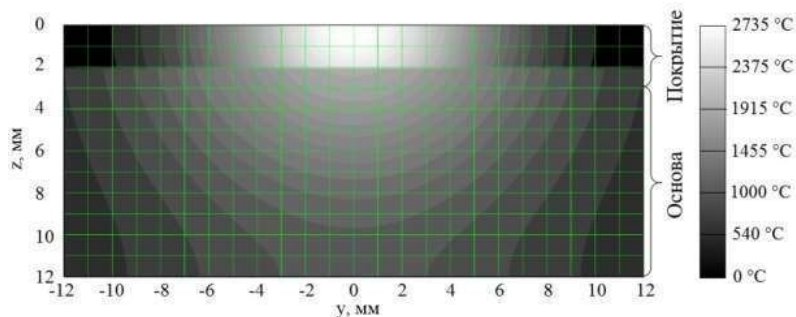


Рисунок 2.3 – Розподіл ізотерм у композиції «покриття – основа»

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

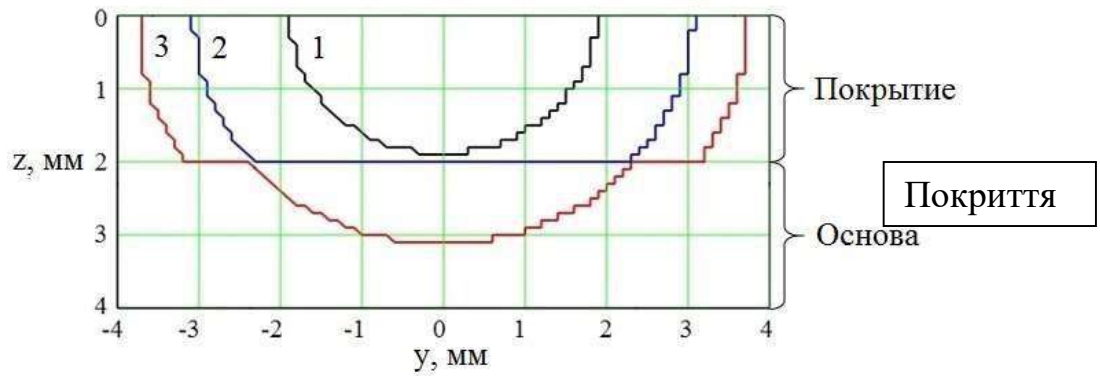


Рисунок 2.4 – Розрахункові криві проплавлення покриття за різних значень погонної енергії:

0,25 МДж/м – 1; 0,40 МДж/м – 2; 0,55 МДж/м – 3

На рисунку 2.5 показаний графік залежності глибини проплавлення підкладки від погонної енергії плазмової обробки при різних значеннях товщини напиленого покриття. При різній товщині покриттів спостерігається пропорційне зростання глибини проплавлення від погонної енергії, проте зі збільшенням товщини покриття спостерігається підвищення середнього значення погонної енергії, необхідної для проплавлення.



Рисунок 2.5 – Залежність глибини проплавлення підкладки від погонної енергії, за різної товщини покриття: 1 – 1 мм; 2 – 1,5 мм; 3 – 2 мм

Для визначення впливу параметрів режиму плазмового оплавлення на

розподіл температур у композиції «покриття – основа» проведено низку розрахунків при зміні одного параметра обробки та сталості інших (таблиця 2.5). Так як напруга в плазмових процесах є функцією від параметрів режиму обробки, а в розробленій моделі цей вплив не враховується, то приймемо його середнім в інтервалі значень струмів, що використовуються 150-180 А, відповідно до досвідчених даних.

За отриманими в результаті розрахунків на вибраних режимах графіків розподілу межі оплавлення (рисунок 2.4) оцінювали глибину та ширину проплавлення. Далі зроблено розрахунки коефіцієнта форми проплавлення ψ , що дорівнює відношенню ширини оплавленої зони e до її глибини h .

Таблиця 2.5 – Дослідні параметри режиму обробки

№ досвіду	Струм I , А	Напруга U , В	Швидкість обробки V , м/год	Діаметр сопла d_s , мм	Довжина каналу сопла l_s , мм	Відстань від сопла до виробу h_s , мм	Витрати плазм. газу G_p , л/хв
1	130; 150; 170	29	6	4	3	8	3
2	150		5; 6; 7;	4	3	8	3
3	150		6	3; 4; 5	3	8	3
4	150		6	4	2; 3; 4	8	3
5	150		6	4	3	6; 8; 10	3
6	150		6	4	3	8	2; 3; 4

Результати обробки даних, отриманих в результаті розрахунків, виконаних на режимах таблиці 2.5, представлені на рисунку 2.8. Проаналізувавши отримані залежності можна виділити один незначний параметр обробки - довжина каналу сопла l_s , зміна якого не призвела до

зміни ψ , однак такий результат пояснюється прийнятим у рамках представленої моделі припущенням, а саме відсутністю залежності напруги на дузі від параметрів режиму обробки. Насправді, зміна даного параметра, за сталості інших параметрів, призводить до підвищення напруги на дузі, в результаті збільшення дугового проміжку, а значить, і збільшення тепlopokладання у виріб.

Підвищення струму I та витрати плазмоутворюючого газу G_p призводить до зменшення ψ . Слід зазначити, що підвищення G_p значно впливає тільки на глибину проплавлення h , тоді як I дуги впливає і на ширину зони оплавлення e . До підвищення приводять збільшення відстані від зрізу сопла плазмотрона до виробу h_s , швидкості обробки V і діаметра плазмоутворюючого сопла d_s , при цьому підвищення V і h_s знижує обидва геометричні параметри зони оплавлення, тоді як збільшення d_s призводить до значного зниження тільки h .

Отримані внаслідок розрахунків дані досить точно узгоджуються з отриманими Б.О. Христофісом залежностями впливу параметрів обробки на геометричні параметри зони плазмового гарту [81]. Однак, при підвищенні h_s , за розрахунковими даними, призводить до зниження глибини проплавлення, тоді як це призводить до її збільшення. Така різниця в даних, так само пояснюється тим, що в розробленій моделі не враховується вплив параметрів режиму на падіння напруги на дузі, а також на ефективний ККД плазмотрона [100]. Таким чином, розроблена модель плазмової обробки композиції «основа – покриття» дозволяє оцінити вплив режимів плазмової обробки на розподіл температур у двошаровому матеріалі, проте, через складний взаємозв'язок напруги на дузі від технологічних параметрів обробки вона має лише наближений характер.

Для запобігання відшарування покриття та підвищення його адгезії необхідно забезпечення температури плавлення на поверхні підкладки [60], при цьому, з метою зменшення впливу на властивості оплавленого покриття

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

частка участі металу підкладки повинна бути мінімальна. Звідси було обрано режими, подані у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Розрахункові параметри режиму плазмової обробки

Покриття	qp, МДж/м	ds, мм	ls, мм	hs, мм	Gp, л/хв
ППМ-8	0,67	4	2	6	2,5
ППМ-6	0,67	4	2	8	2,5

Таким чином, внаслідок відмінностей у теплофізичних характеристиках (таблиця 2.2) досліджуваних покриттів режим обробки покриття з ПП ППМ-6

відрізняється від покриття з ППМ-8 тільки збільшеною відстанню від зрізу сопла плазмотрону до виробу. Розподіл температурних полів, отриманих у результаті розрахунків, при вибраних режимах обробки представлені рисунку 2.9. Внаслідок малої відмінності розподілу ізотерм у композиціях з покриттями на основі ППМ-6 та ППМ-8 Рисунок представлений лише один. Отримана за результатами розрахунків матриця значень температури.

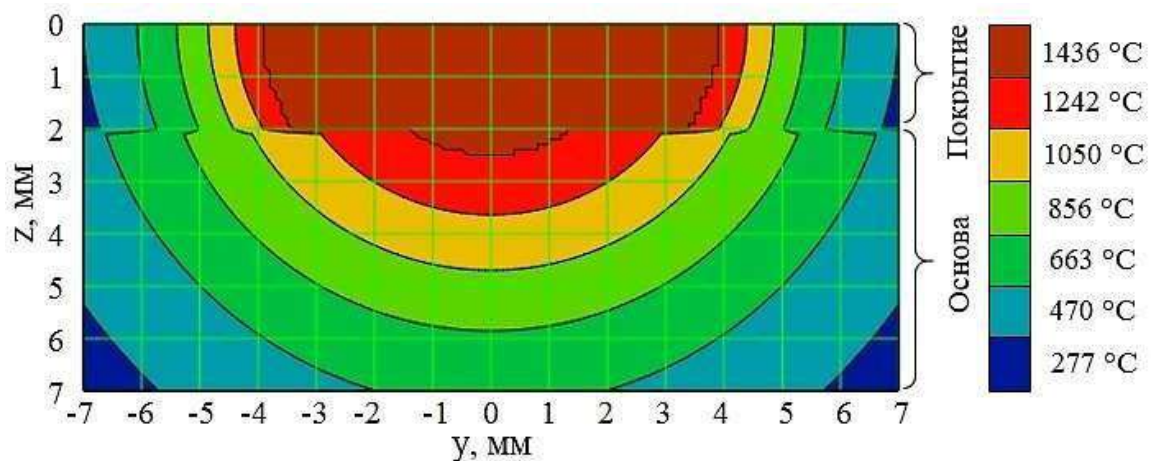


Рисунок 2.7 – Розподіл температурних полів під час обробки на вибраних режимах

Зміцнення поверхні під час оплавлення покриття здійснюється шляхом послідовного формування локальних зон оплавлення, з перекриттям

шарів. Виходячи з рисунку 2.9 для забезпечення проплавлення основи по всій поверхні виробу, з метою запобігання відшаруванням, та створення монолітного покриття по всій поверхні, крок між сусідніми проходами має становити 3–4 мм. Однак внаслідок попереднього підігріву від попередніх проходів ця відстань може змінюватися.

2.2. Аналіз структурних перетворень під час оплавлення металізаційного покриття на основі результатів моделювання

Для прогнозування структурних перетворень в оплавленій зоні необхідно знати час перебування металу в розплавленому стані, а також швидкість нагрівання та охолодження. Для цього, використовуючи отриману модель, побудуємо графіки термічного циклу T та миттєвих швидкостей нагріву та охолодження W при плазмовій обробці для точок, розташованих у початковий момент часу на відстані 25 мм від джерела нагріву, на одній осі з ним (рисунок 2.10).

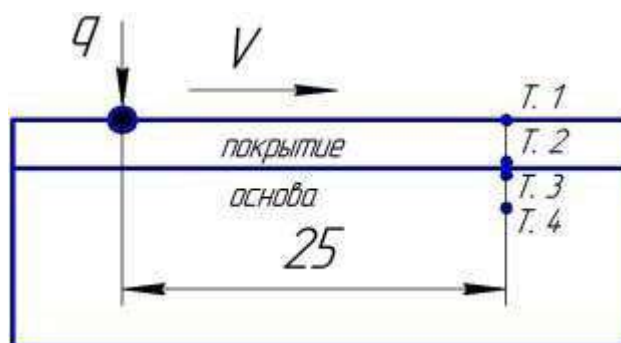
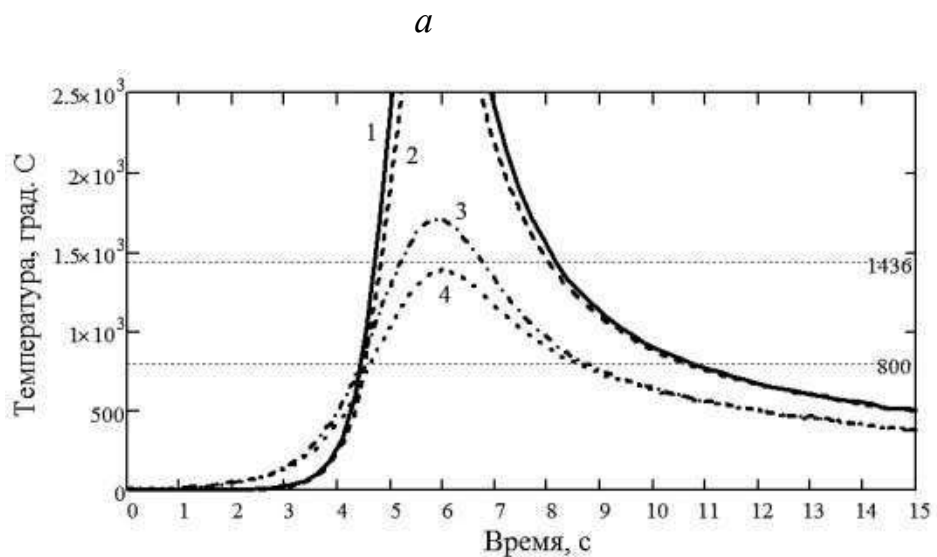


Рисунок 2.9 – Схема розташування точок, що розглядаються.

На графіці (рисунок 2.10 а) видно, що термічні цикли для покриття і підкладки сильно відрізняються. Температура підкладки (криві 3, 4) починає зростати на 1,5 секунд раніше температури покриття (криві 1, 2), що

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

пов'язано з більшою теплопровідністю першого. Однак, у міру наближення джерела нагріву до розглянутих точок покриття нагрівається значно швидше і сильніше, ніж підкладка, аж до температури кипіння. Така залежність добре ілюструється розрізом моделі вздовж осі X (рисунок 2.10). На графіку видно, що точка, розташована на поверхні покриття, знаходиться в розплавленому стані 3,5 с, тоді як поверхня основи всього 1,5 с. Така різниця пояснюється тим, що більша частина енергії стиснутої дуги витрачається на нагрівання та плавлення покриття, а значить і об'єм розплавленої ванни покриття більше, ніж у основи. Крім цього, тепло, що підводиться, в основі відводиться швидше, ніж у покритті внаслідок більшої товщини і теплопровідності.



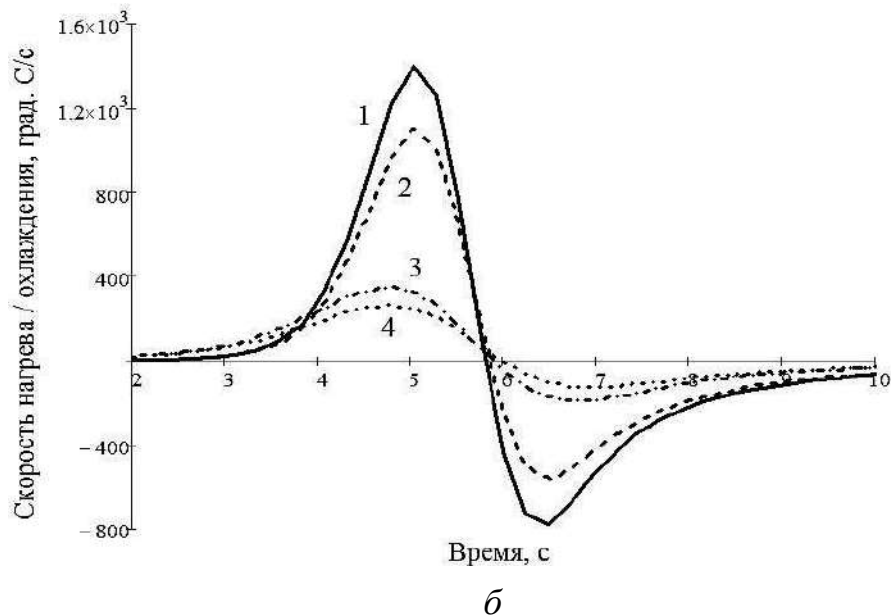


Рисунок 2.10 – Графіки термічного циклу обробки (а), швидкостей нагрівання та охолодження (б) точок, розташованих на різній глибині композиції від поверхні покриття:

1 – 0 мм (поверхня покриття); 2 – 2 мм (покриття); 3 – 2,1 мм (поверхня підкладки); 4 – 4 мм (підкладка)

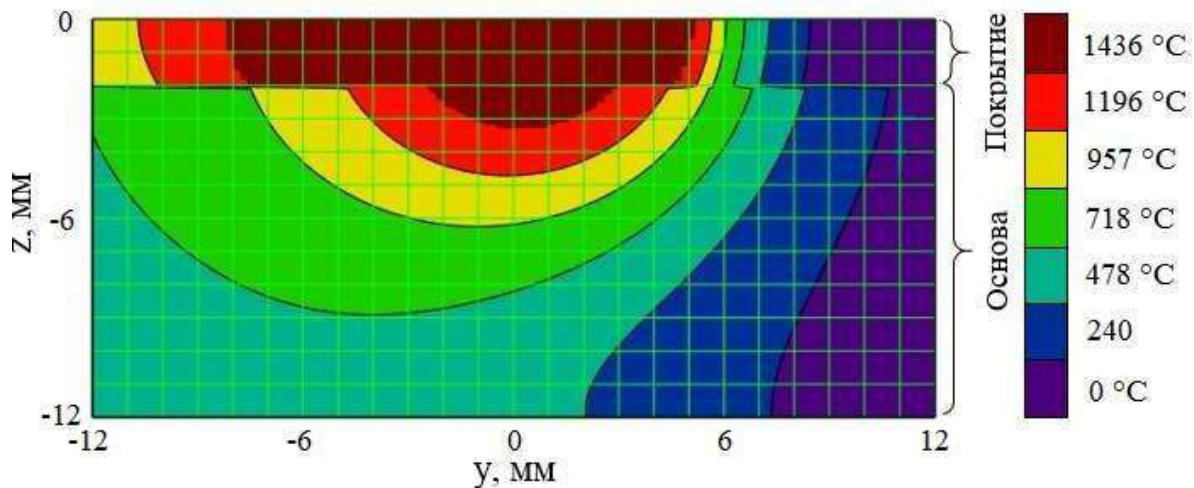


Рисунок 2.11 – Розподіл ізотерм у площині XOZ

При високих температурах ($T > T_{пл}$), у покритті спостерігаються більш високі швидкості нагріву та охолодження (рисунок 2.11 б) ніж в основі, так максимальна швидкість охолодження поверхні покриття становить $770 \text{ }^\circ\text{C/с}$, тоді як у підкладки всього $200 \text{ }^\circ\text{C/с}$. Такі швидкості

охолодження вищі за критичні для вуглецевих сталей. Однак, в інтервалі температур $T_{пл} - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, середня швидкість охолодження металу покриття та основи вирівнюється і становить $120-130\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Таким чином, охолодження композиції відбувається з великим ступенем переохолодження, що сприятливо для отримання дрібнодисперсної структури мартенситного типу.

У першому наближенні кристалізується переплавлений метал покриття можна уявити, як квазірівноважну систему, в якій фазові перетворення в процесі охолодження відбуваються в послідовності, що визначається за допомогою вертикальних розрізів діаграми стану Fe-C-Cr при 8% Cr для ППМ-6 (рисунок 2.13, а) і 22 % Cr для ППМ-8 (рисунок 2.13, б), побудованих на підставі даних [101, 102], природно, з відхиленням від рівноважної тим більше, чим більша швидкість охолодження в процесі кристалізації.

При оплавленні покриттів на основі ПП ППМ-6 в першу чергу утворюються кристали аустеніту дендритної морфології, між осями яких кристалізується евтектика аустеніт + карбід типу M_7C_3 , в областях твердого розчину (аустеніту), збагачених вуглецем і хромом, відповідно до розрізу діаграми стану з карбідом типу M_7C_3 , можливе утворення вторинних карбідів $M_{23}C_6$. У процесі подальшого охолодження, залежно від його швидкості, в твердому стані розвивається виділення надлишкових карбідів і відбувається мартенситне перетворення переохолодженого аустеніту, т.к. швидкість охолодження виявляється вищою критичної для твердого розчину, легованого хромом. Таким чином, в процесі кристалізації очікується отримання структури мартенситу, пластинчастої морфології, розташування яких успадковують дендрити аустеніту, оточені сіткою карбідної евтектики. У даному випадку умови охолодження далекі від рівноважних, протікання мартенситного перетворення можна оцінити, залучаючи термодинамічні діаграми перетворення аустеніту, наявні для

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

сталей 40X13 і X12 [103].

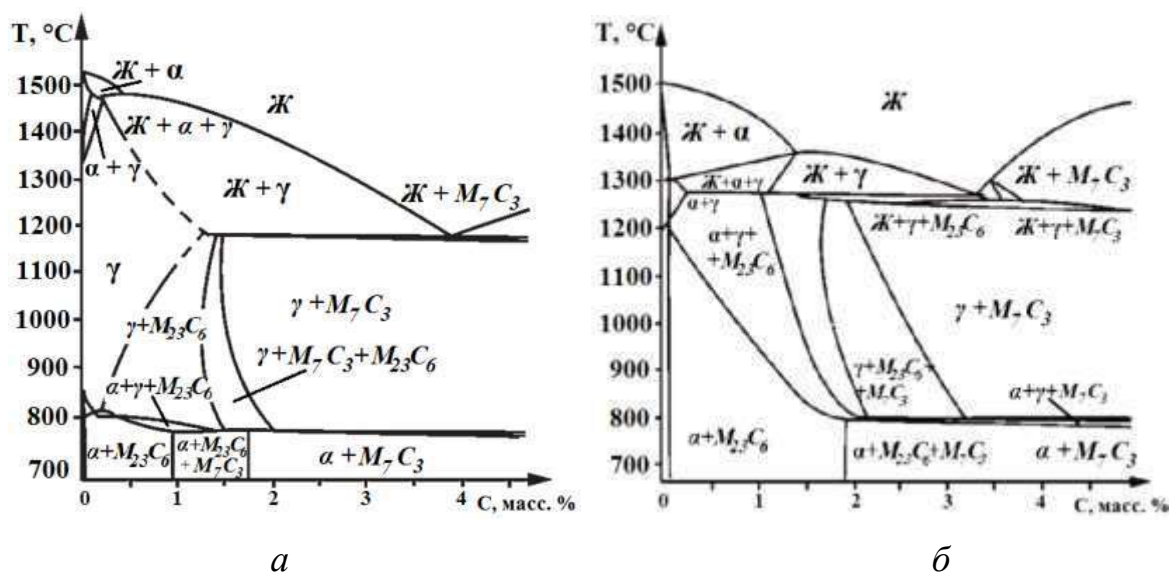


Рисунок 2.12 – Вертикальні розрізи діаграми стану Fe-C-Cr: 8 % Cr – а; 22% Cr - б

Характер і послідовність фазових перетворень в процесі охолодження оплавленого металу при плазмовому впливі на покриття ППМ-8 принципово аналогічні тим, які відбуваються в процесі кристалізації оплавленого покриття з ПП ППМ-6 з деякими відмінностями в температурах і об'ємі фазових перетворень і морфології структурних тієї ж послідовності. Так, твердий розчин у покритті ППМ-8 містить більше хрому, ніж у ППМ-6, а кількість евтектики, що утворюється, відповідно менше, отже, кількість утвореного мартенситу буде більше. Після виділення карбідів у переплавленому металі напиленого покриття ППМ-8 в аустеніті міститься за розрахунком приблизно вдвічі менше вуглецю та більша кількість хрому, порівняно з ППМ-6.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛІЗАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ, ОПЛАВЛЕНИХ ПЛАЗМОЮ

3.1. Матеріали для дослідження

Для нанесення металізаційних покриттів було використано ПП марки ППМ-8 складу 80Х22Т2Ю2, діаметром 2 мм [36]. Її також застосовували для наплавлення шарів та проведення порівняльних випробувань стійкості оплавлених та наплавлених покриттів. В якості основи використовували пластини з вуглецевої сталі 40 ГОСТ 1050-88.

При напиленні та оплавленні покриттів застосовували такі матеріали: ПП ППМ-8; сталь 40 за ГОСТ 1050-88; ацетон ГОСТ 2768-84; дріб чавунний колотий марки ДЧК 1 ГОСТ 11964-81; стиснене повітря 5 класу ГОСТ 17433-80; пропан ГОСТ 20448-90; аргон вищого ґатунку за ГОСТ 10157-79.

При дослідженні структури, фізико-механічних та службових властивостей покриттів застосовували суміш концентрованих азотної HNO₃ за ГОСТ 4461 та соляної HCl за ГОСТ 3118 кислот, взятих у співвідношенні 1:3 за обсягом (царська горілка), пасту ГОІ № 2 ТУ 6-18-36 , Алмазну пасту НОМ 60/40 ГОСТ 25593, шкірку шліфувальну паперову зернистістю 25 за ГОСТ 6456.

Струменево-абразивну обробку (САО) поверхні перед напиленням покриття проводили при параметрах, зазначених у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Параметри попередньої САТ

Діаметр сопла пістолета, мм	Дистанція, мм	Тиск повітря, МПа	Кут атаки, град.
8	150	0,6	70-90

Покриття товщиною 2-0,3 мм наносили на сталеві пластини розмірами 240×70×10 мм після САО за допомогою активованого апарату дугової

металізації (АДМ) на режимах, зазначених у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри режиму АДМ

Струм, А	Напруга, В	Швидкість переміщення апарату, м/год	Дистанція напилення, мм	Тиск повітря, МПа	Тиск пропану, МПа
200	28	360	100	0,30	0,32

Для здійснення плазмового оплавлення металізаційних покриттів використана багатоцільова установка для плазмової обробки [104] (рисунок 3.1), що являє собою плазмовий пальник [105, 106] (рисунок 3.2), встановлену на універсальному наплавному верстаті У-653, блок управління плазмотроном джерело живлення ВД-306Ф. Досліди проводилися на струмах прямої та зворотної полярності. При роботі плазмотрона на прямій полярності як катод використовували лантанований вольфрамовий пруток запресований в мідний водоохолоджуваній електродотримач (рисунок 3.2, а), при роботі на зворотній полярності - мідний водоохолоджуваній анод з вольфрамовою вставкою (рисунок 3). У плазмотроні використовується тангенційна система подачі плазмоутворюючого газу. Як захисний і плазмоутворювальний газ використовувався аргон. Параметри режиму плазмової обробки, вибрані за результатами розрахунків у побудованій моделі, наведено у таблиці 3.3. Оплавлення всієї поверхні пластини, здійснювалося шляхом послідовного формування локальних ділянок оплавлення з кроком 3,5–4 мм.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

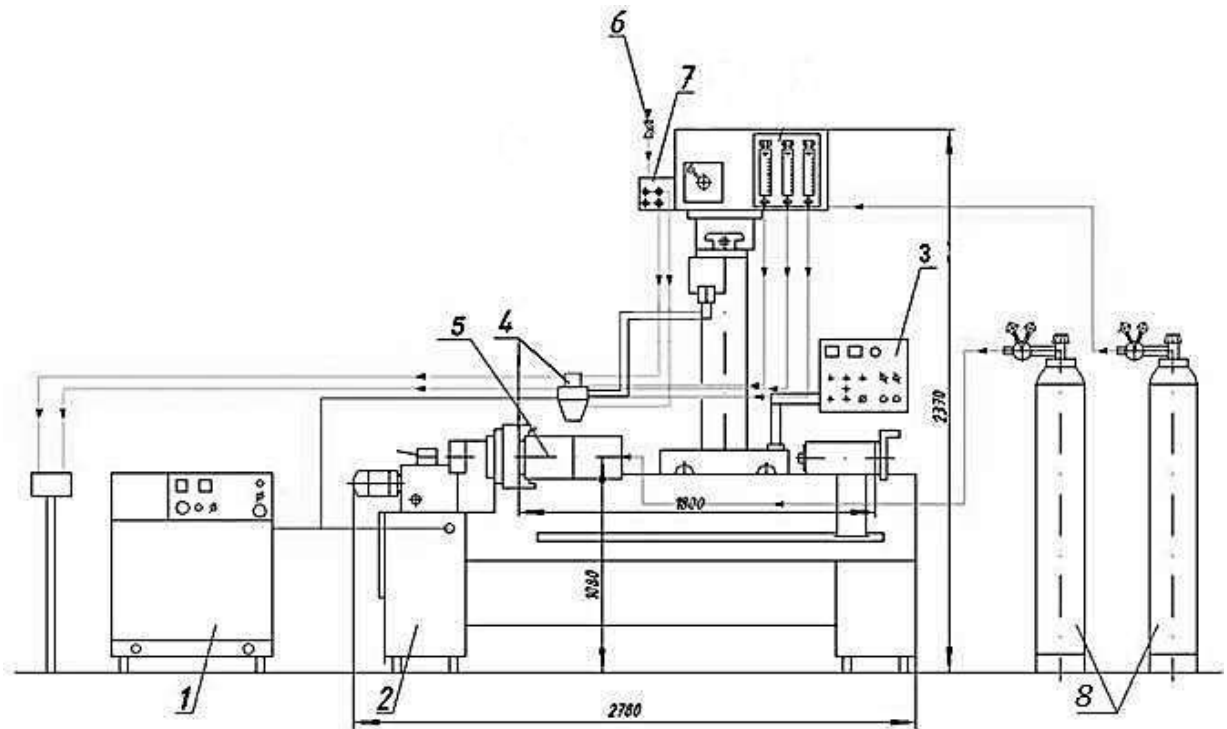


Рисунок 3.1 – Установка плазмового оплавлення покриттів: 1 – джерело живлення ВД-306Ф; 2 – верстат наплавлення У-653; 3 – пульт управління; 4 – плазмотрон; 5 – виріб; 6 – вентиль; 7 – розподільник води; 8 – балони з аргоном

Таблиця 3.3 – Параметри режиму плазмового оплавлення

Полярність	Погонне енергія, МДж/м	Діаметр сопла, мм	Дистанція обробки, мм	Витрата плазмоутворюючого газу, л/хв	Витрата захисного газу, л/хв
Пряма	0,67	4	6	2,5	4,5
Зворотній	0,61	4	6	3	4,5

Вибрані режими відповідають отриманим за розрахунками згідно з розробленою математичною моделлю розподілу температур у композиції під впливом плазмового джерела нагріву (див. розділ 2).

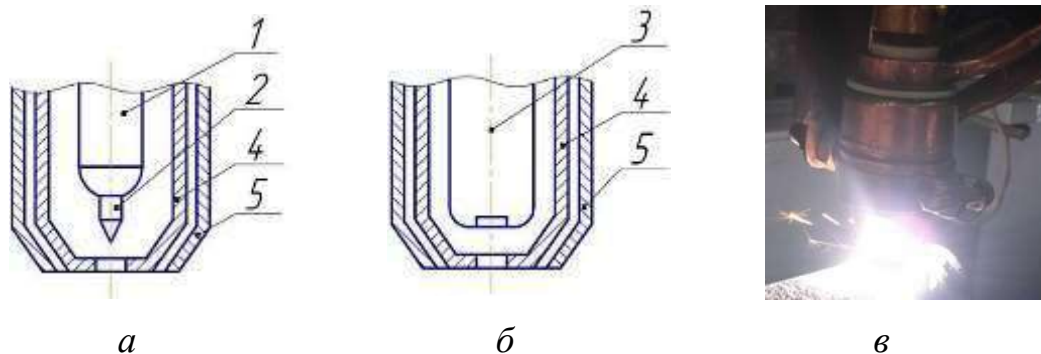


Рисунок 3.2 – Схеми плазмотронів: для роботи на прямій полярності – а; на зворотній полярності – б; плазмотрон у дії – в

1 – мідний електродотримач; 2 – вольфрамовий електрод-катод; 3 – мідний електрод-анод із вольфрамовою вставкою; 4 – плазмоутворююче сопло; 5 – захисне сопло

Для порівняння властивостей покриттів після плазмового оплавлення з наплавленим металом виконали аргонодугову наплавку ПП, що досліджується. Наплавку виконували у двох варіантах: 1 шар і для зменшення впливу перемішування з основним металом 3 шари. Режими наплавлення - струм 170 А, напруга 34 В. Наплавлення шарів виконували безперервно, без охолодження шарів.

3.2. Методи дослідження

Для проведення досліджень із пластин після напилення, оплавлення та наплавлення вирізали на електроерозійному дротяно-вирізному верстаті AGIE CHARMILLES CUT 20 зразки розмірами $10 \times 10 \times (10+h)$ мм, де h – товщина покриття (рисунок 3.3). Підготовку шліфів металізаційних покриттів до та після плазмового оплавлення виконували на верстаті Laborol з використанням пасти ГОІ № 2 та алмазної пасти НОМ 60/40. Травлення зразків здійснювали царською горілкою.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

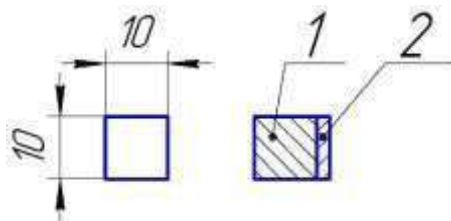


Рисунок 3.3 – Схема досліджуваних зразків: 1 – основа; 2 – покриття

Фазовий склад покриттів визначали на рентгенівському дифрактометрі Bruker D8 Advance у Cr- α випромінюванні. Структуру та мікрохімічний склад покриттів вивчали на оптичному мікроскопі ЛабоМет-3 та сканувальному електронному мікроскопі VEGA II ХМУ. Мікротвердість за їх перерізом вимірювали на мікротвердомір Shimadzu HMV-G21DT при 0,5 Н (50 гс) і 3 Н (300 гс). Дослідження виконані разом із Р.А. Збираємо в лабораторії конструкційного матеріалознавства ФБГУН ІМАШ УРО РАН.

Хімічний склад з поверхні покриттів визначали фотоелектричним спектральним методом згідно з ГОСТ 18895-97. Дослідження виконані разом із Ю.І. Орловим у лабораторії аналітичного контролю ВАТ «УІМ».

Зносостійкість визначали для зразків металізаційних покриттів до і після плазмового оплавлення, а також наплавлених шарів шляхом здійснення зворотно-поступальних рухів по шліфувальному паперу на основі електрокорунду (рисунок 3.4). Шлях тертя зразка за одне випробування за швидкості руху 0,158 м/с встановлювали рівним 60 м. Нормальне навантаження на зразок – 10 кг, питома навантаження 1 МПа. Довжина одного робочого ходу зразків становила 0,125 м, з кроком зразка за один робочий хід – 0,0012 м. Показник зносостійкості покриттів, що дорівнює відношенню змін маси еталона та зразка, визначали за результатами трьох випробувань. Як зразок приймали металізаційне покриття до плазмового оплавлення. Дослідження виконані разом із М.А. Пилиповим на кафедрі металознавства ІММТ УрФУ.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

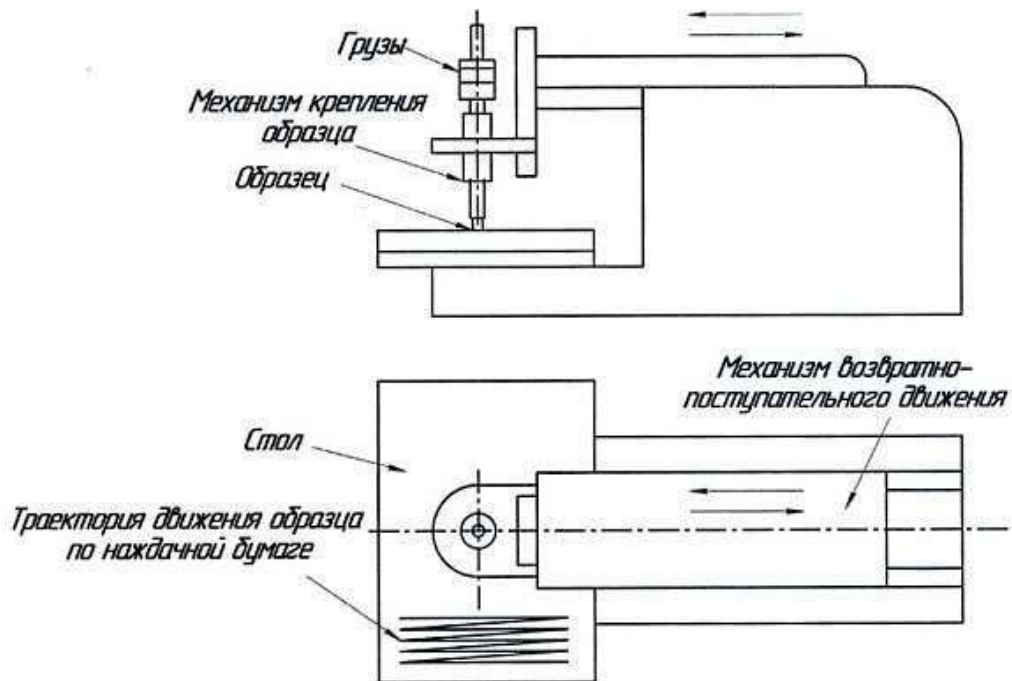


Рисунок 3.4 – Схема зношування за закріпленням абразивом

3.3. Результати дослідження та їх аналіз

Металізаційне покриття має характерну для всіх видів напилення шарувату структуру і складається з сильно деформованих зерен – ламелів, товщиною 5–10 мкм (рисунок 3.5). Товщина покриття складає 1840 мкм. Видно, що покриття характеризується значною неоднорідністю структури, наявністю пір та несплошностей. Тріщин у покритті не виявлено. Кордон між покриттям і основою має характерний зигзагоподібний вигляд. У процесі напилення відбулося хороше з'єднання з основою, про що говорить відсутність темного оксидного прошарку на межі покриття з основою.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

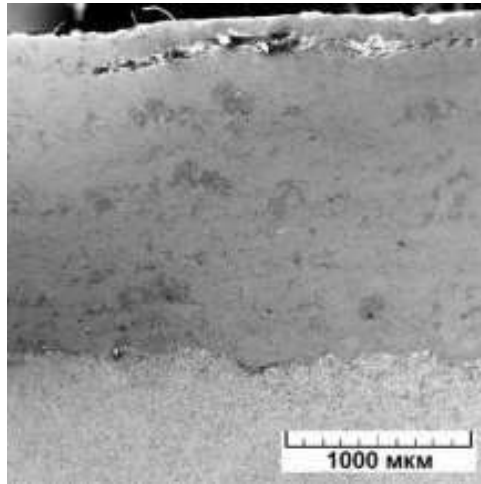


Рисунок 3.5 – Макрошліф напиленого АДМ покриття

Травлення виявляє кілька характерних кольорів та відтінків структурних складових (рисунок 3.6). Покриття являє собою тонкі хвилеподібні прошарки білого, сірого і чорного кольору, що чергуються, різної величини і конфігурації [43]. Також спостерігається включення досить великих частинок більш округлої та глобулярної форми. Крім того, присутні пори глобулярної та дископодібної форми. Ймовірно, ділянки темно-сірого та чорного кольору є оксидними прошарками. Слабкий вплив травника на білі структурні складові говорить про те, що це металева матриця з великим вмістом легуючих елементів. Ці металеві фрагменти є твердим розчином хрому в мартенситі. У найбільших частинках покриття спостерігається структура точкового характеру, схожа на відпущений мартенсит із включеннями дисперсних карбідів.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

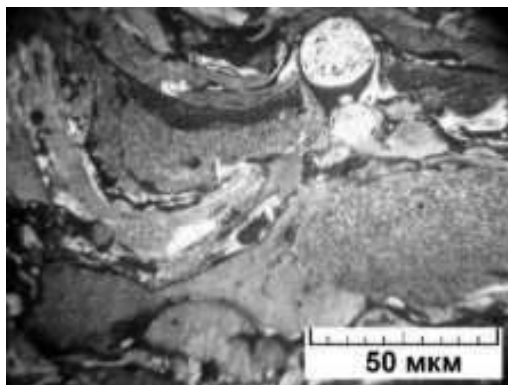


Рисунок 3.6 – Мікроструктура напиленого АДМ покриття

Плазмова обробка покриття виконувалася на струмах прямої та зворотної полярності. Незважаючи на високу теплову ефективність плазмової поверхневої обробки струму зворотної полярності, її застосування для оплавлення металізаційного покриття дає негативні результати. При виконанні такої обробки спостерігається прив'язка катодної плями до локальних ділянок покриття, мабуть до включень тугоплавких елементів, що призводить до стягування металу розплавленого покриття в даній зоні і утворення кулястих ділянок переплавленого покриття.

При виконанні оплавлення на струмі прямої полярності спостерігається рівномірне плавлення покриття без локальних прив'язок уздовж зони обробки. Зона оплавлення, утворена в результаті одиничного проходу плазмотрона, нагадує наплавлений валик, що пояснюється дією поверхневого натягу на метал розплавлений. Макрошліф поперечного перерізу оплавленої зони (рисунок 3.7) показує, що плазмове оплавлення призводить до ущільнення структури металу покриття за рахунок усунення неоднорідностей, при цьому периферійний метал стягується в центральну зону, утворюючи подрізи на поверхні напиленого покриття. Отримані геометричні параметри зони оплавлення корелюють з результатами розрахунків у розробленій моделі, при цьому різниця між розрахунковим та досвідченим коефіцієнтом форми проплавлення складала не більше 20%.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

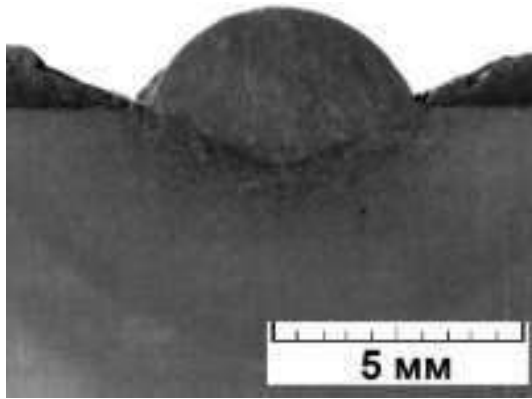


Рисунок 3.7 – Макрошліф локальної зони оплавлення

Плазмова обробка напиленого покриття з перекриттям локальних зон оплавлення призвела до його повного переплаву та усунення структурних неоднорідностей (рисунок 3.8). Кожен наступний прохід приводив до оплавлення напиленого покриття металу попереднього проходу, при цьому формувалася рівна поверхня оплавленого покриття. Товщина переплавленого покриття складає 2380 мкм. Отже, за зміною товщини покриття, змішування з основою після плазмового оплавлення становить приблизно 40%.

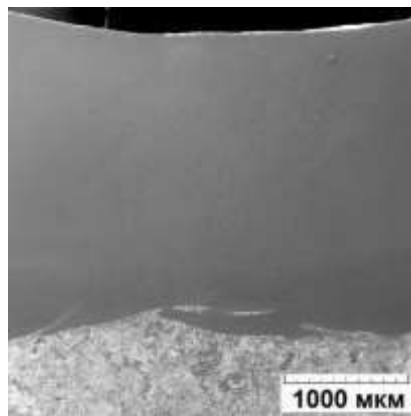


Рисунок 3.8 – Макрошліф металізаційного покриття після плазмового оплавлення

Оплавлене покриття має однорідну структуру, в якій, на перший

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

погляд, відсутні оксидні фази, у великій кількості, що були у вихідному покритті напиленому [108]. Однак на знімку поперечного перерізу, нетривленого зразка, при збільшенні в 1000 разів видно чорні вкраплення круглої форми розміром до 2 мкм (рисунок 3.9 а), імовірно оксидів або порожнин. На знімку протруєного зразка видно, що дані включення та карбіди, розташовуються переважно за межами зерен (рисунок 3.9 б).

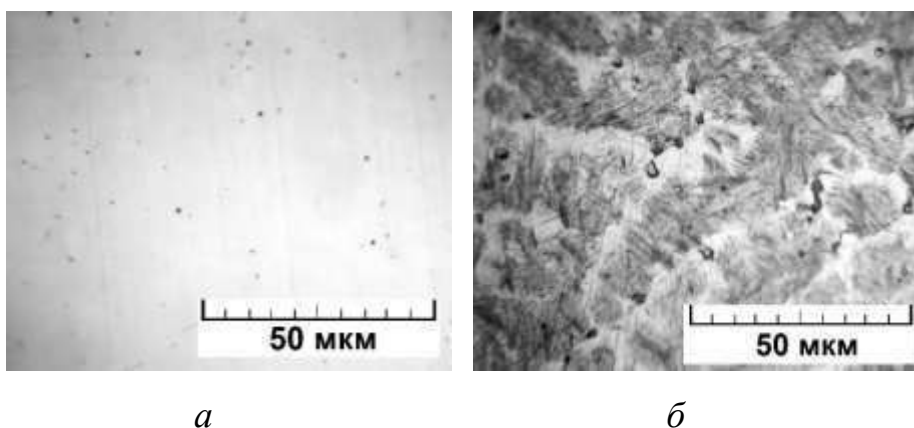
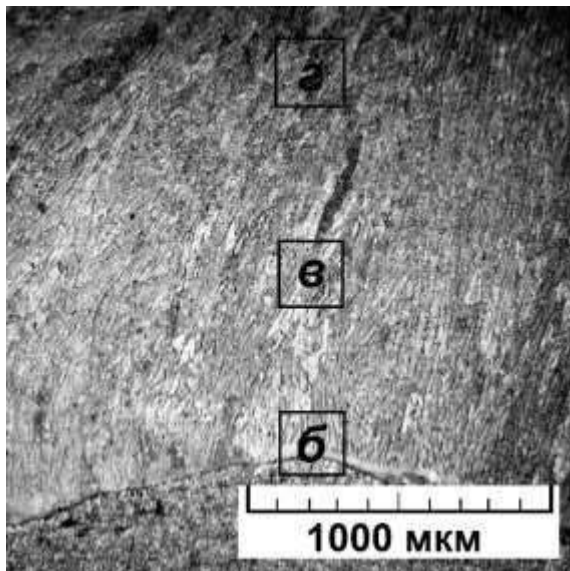


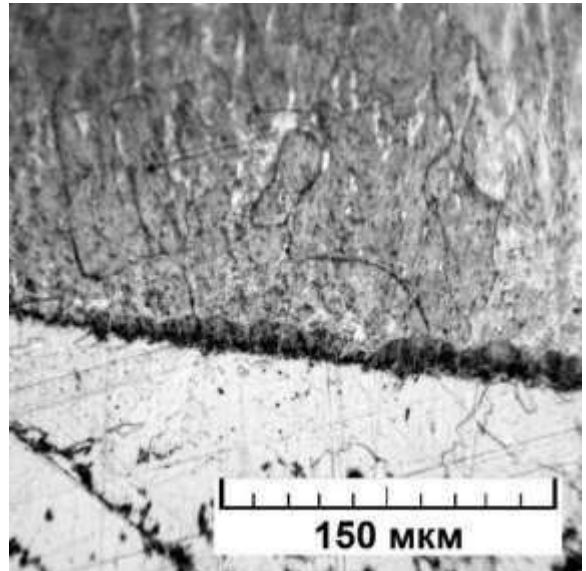
Рисунок 3.9 – Мікроструктура оплавленого покриття: до травлення – а, після травлення – б

Металографічне вивчення поперечних шліфів показало, що зона сплавлення та ЗТВ оплавленого покриття мають типовий для наплавлених шарів вигляд (рисунок 3.10). У прилеглому до оплавленого покриття шарі основного металу спостерігається тонка (50 мкм) зона обезуглерожування. ЗТВ складається з характерних ділянок та має ферито-перлітну структуру [109]. При великому збільшенні у всьому перерізі покриття спостерігається голчаста структура мартенситу. Структура переплавленого покриття має дендритну будову і складається з чотирьох основних характерних зон у порядку їхнього розташування від основного металу до поверхні оплавлення (рис. 3.10 а). Зона 1. До основної сталі примикає тонка зона, товщиною 50-150 мкм, що складається з дрібних рівноосних зерен 8-9 балів.

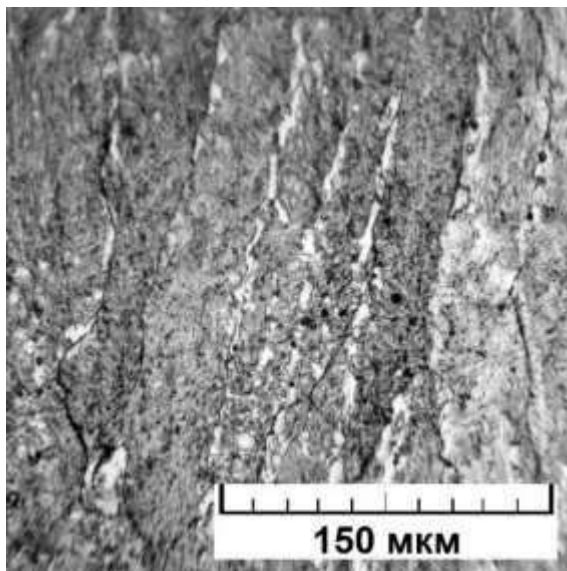
					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47



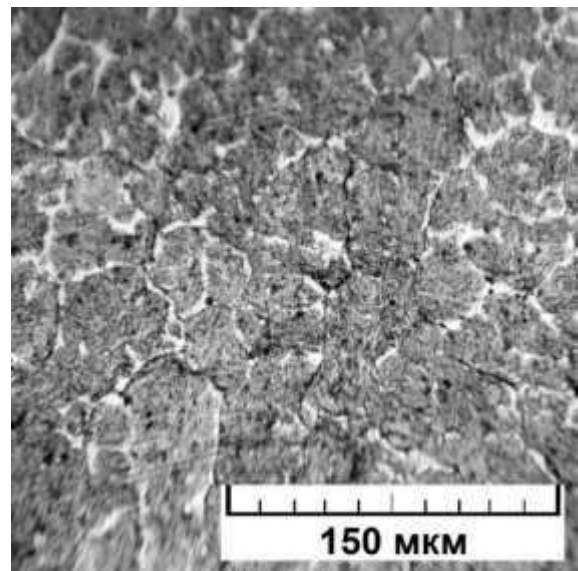
a



б



в



г

Рисунок 3.10 – Мікроструктура оплавленого покриття після травлення:

a- загальний вигляд, *б* - зони 1 і 2, - зона 3, *г* - зона 4

Зона 2. До першої зони примикає тонкий шар, до 50-100 мкм, рівноосних зерен трохи більш крупнозернистого (6-7 балів) металу. 1 і 2 шари структурою являють собою пакетний мартенсит, характерний за морфологією для мало- і середньовуглецевих сталей із вмістом вуглецю до 0,5–0,6 % [110], що містить виділення дисперсних карбідів. Таку будову цієї зони можна пояснити зниженням швидкостей охолодження при наближенні

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

до центру переплавленого шару. Внаслідок малої товщини 1 і 2-ої зон їх будова показано рисунку 3.10, б.

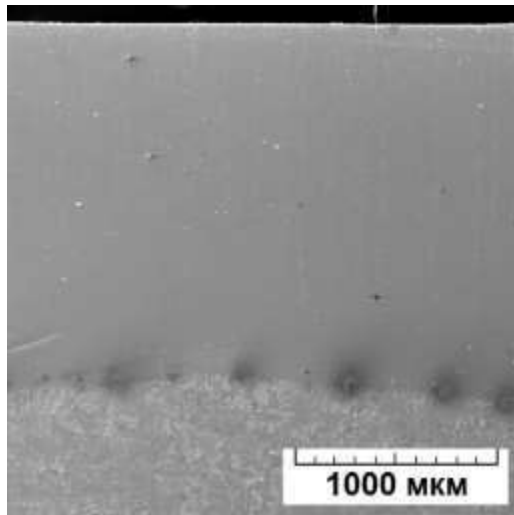
Зона 3. 1 і 2-а зони рівноосних зерен переходять в основний шар витягнутих стовпчастих зерен (дендрит), довжиною 300-500 мкм і шириною 30-60 мкм, орієнтованих переважно у бік максимального тепловідведення, тобто. перпендикулярно поверхні розділу переплавленого і основного металу (рисунок 3.10, в). Товщина цієї зони становить 1500-2000 мкм. Структура зерен є пакетним мартенситом однієї – двох орієнтувань, оточений тонкою оболонкою карбідної евтектики.

Зона 4. Верхня частина переплавленого покриття (рисунок 3.10, г), товщиною до 500 мкм, складається з рівноосних зерен розміром 20-50 мкм, що складаються з мартенситу з виділенням дисперсних карбідів. Ця зона утворюється в результаті рівномірного тепловідведення на поверхні оплавленого шару при прогріванні покриття.

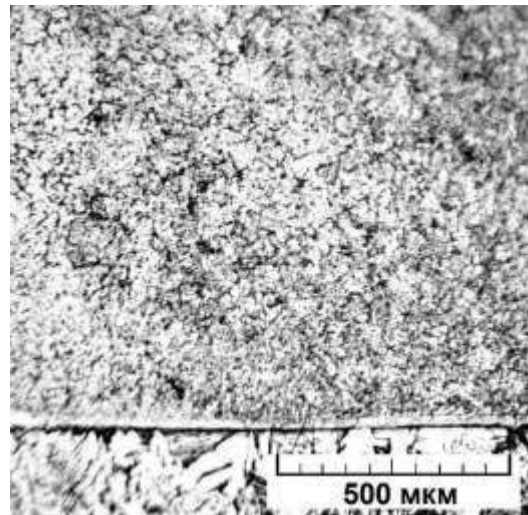
Загальний вигляд металу, наплавленого порошковим дротом ППМ-8 в один шар представлений рисунку 3.11, а.

Наплавлений метал має характерну пористу структуру і складається з легованого мартенситу [109] з великими частинками зміцнювальних фаз, що виділилися по межах зерен (рисунок 3.11, б). Товщина наплавленого шару складає 1750 мм. Видно, що метал характеризується однорідністю структури, відсутністю великих пір та несплошностей. Лінія сплавлення з підкладкою щільна, перехідна зона до основного металу відсутня (рисунок 3.11 в).

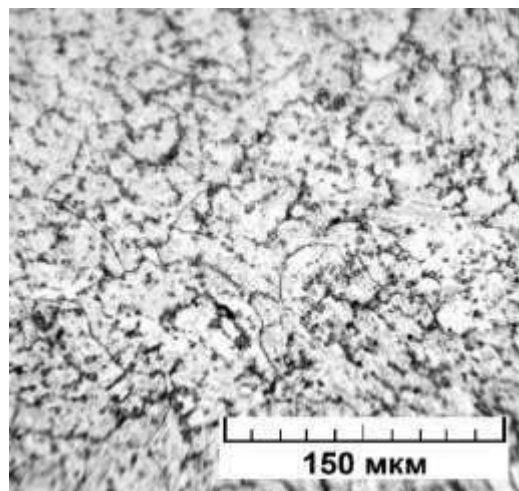
					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49



a



б



в

Рисунок 3.11 – Шліф одношарового наплавлення: загальний вигляд – *a*;
перехідна зона –
б; напавлений метал – *в*

Метал напавленийу 3 шари має структуру без видимих меж між шарами (рисунок 3.12). Товщина покриття складає 3,95 мм. Напавлення характеризується відсутністю великих пір і несплошностей.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

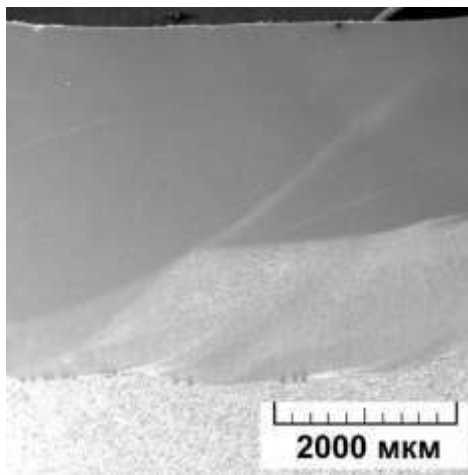


Рисунок 3.12 – Макрошліф тришарового наплавлення

За товщиною покриття виявляються дві ділянки з різною структурою. Ділянка 1, що представляє поверхневу частину наплавленого шару, має крупнокомірчасту структуру і складається з легованого мартенситу з дисперсними частинками зміцнювальних фаз, що виділилися по межах зерен (рисунок 3.13, а). Очевидно, що ця ділянка являє собою два поверхневі шари наплавленого металу. Ділянка 2 сильніше схильний до дії травника, ніж ділянка 1, що пов'язано з більшою часткою основного металу в процесі сплавлення. Дана ділянка має зеренну структуру із зерном різного розміру (рисунок 3.13 б) що, ймовірно, обумовлено багаторазовим нагріванням даної ділянки в процесі тришарового наплавлення. Необхідно відзначити, що ділянка має нерівномірну товщину, яка змінюється від 06 до 16 мм.

Рентгеноструктурний аналіз отриманих покриттів до та після оплавлення підтверджує результати металографії, що металева матриця всіх типів покриттів складається переважно з мартенситу. Єдиною надійно реєструється фазою всіх покриттів є твердий розчин на основі α -заліза. Інших фаз на дифрактограм не виявлено, ймовірно, внаслідок їх малої кількості в покриттях.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

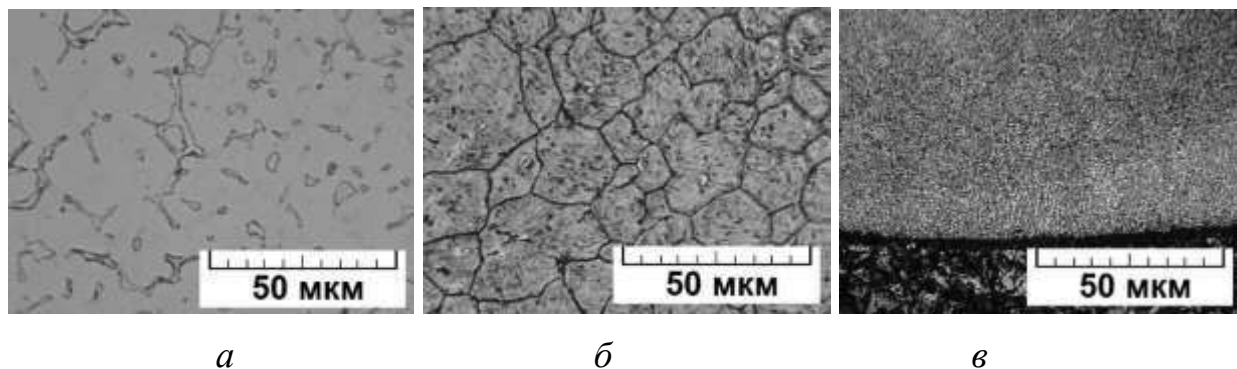


Рисунок 3.13 – Мікроструктура металу, наплавленого у 2 шари: ділянка 1 – а;
ділянку 2 – б; перехідна зона – в

За результатами мікрохімічного аналізу видно, що всі хімічні елементи по товщині напиленого покриття розподілені нерівномірно (рисунок 3.14), що свідчить про складний фазовий склад покриття. На підставі наведених даних можна стверджувати, що основною фазою покриття є твердий розчин легуючих елементів на основі Fe, в якому нерівномірно розподілені оксиди переважно типу $(Al, Ti)2O_3$, про що свідчить підвищення концентрації Al та Ti у місцях підвищеного вмісту кисню. У підкладці поблизу покриття спостерігається підвищений вміст кисню і алюмінію, що свідчить про активну дифузії даних елементів з покриття в підкладку.

На графіку розподілу елементів покриття після плазмового оплавлення (рисунок 3.15) видно, що всі хімічні елементи по товщині покриття розподілені практично рівномірно, що свідчить про те, що основною фазою покриття є твердий розчин легуючих елементів, головним чином, хрому в залізі. Слід зазначити, що у покритті після оплавлення відсутні O, Al і Ti. Мікрохімічний аналіз темних включень, виявлених у покритті після оплавлення (рисунок 3.9 а), показав повну відповідність концентрації легуючих елементів з основним металом покриття, що говорить про те, що це мікропорожнечі.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

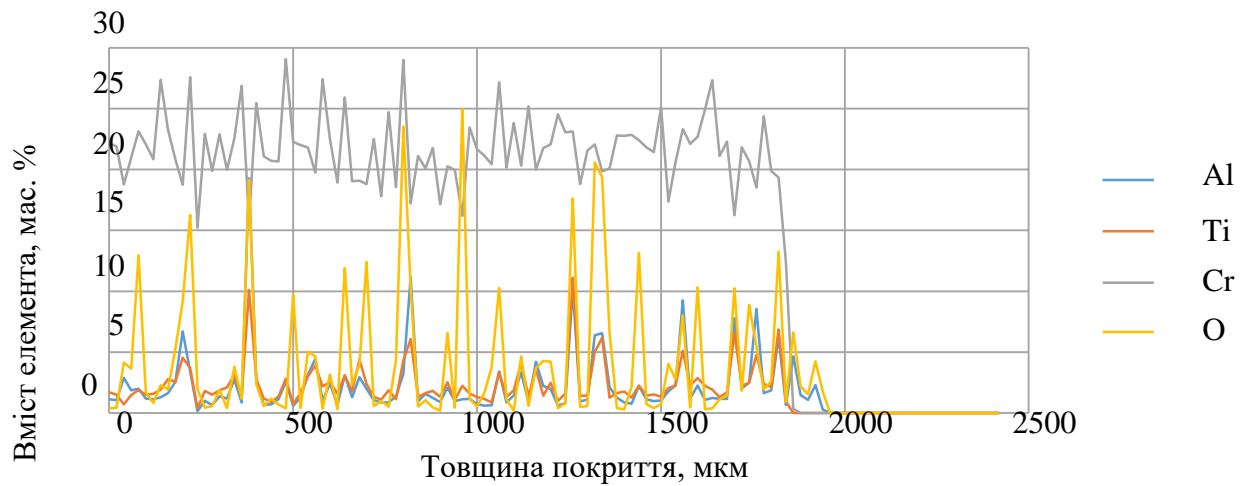


Рисунок 3.14 – Розподіл хімічних елементів за товщиною напиленого АДМ покриття

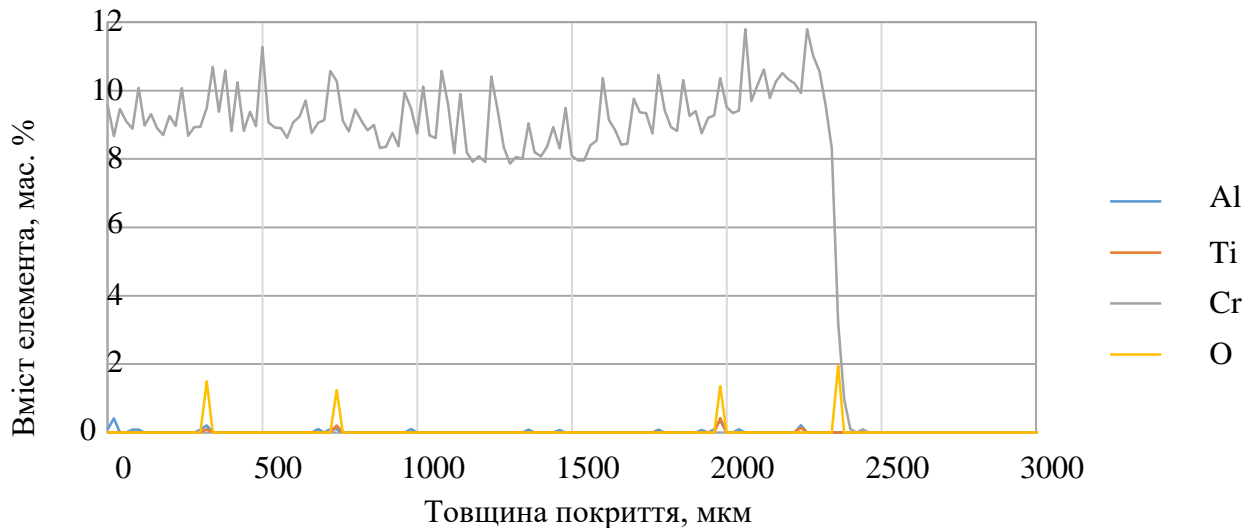


Рисунок 3.15 – Розподіл хімічних елементів за товщиною напиленого АДМ покриття після плазмового оплавлення

Наплавлення аналізованим порошковим дротом призводить до одержання металу з рівномірним розподілом легуючих елементів за товщиною шару (рисунок 3.16), що підтверджує дані про фазовий склад, отримані методом рентгеноструктурного аналізу. Основною фазою покриття є легований мартенсит. У металевій матриці в невеликому

кількості розподілені дисперсні карбіди Cr і Ti, що виділилися за межами зерен. Кисень у наплавленому металі відсутня.

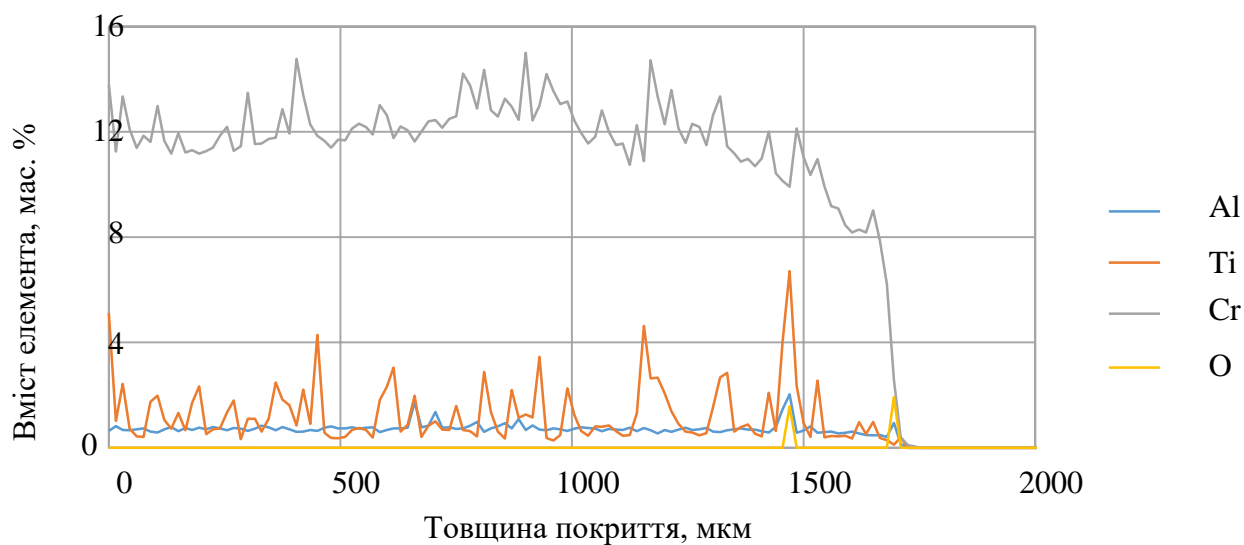


Рисунок 3.16 – Розподіл хімічних елементів за товщиною наплавленого шару

Хімічні елементи за товщиною тришарового наплавлення розподілені нерівномірно (рисунок 3.17). Відповідно до розподілу елементів можна за товщиною покриття виділити дві області: верхня (зона 1), ймовірно, відповідає другому та третьому наплавленим шарам і характеризується найбільшим вмістом легуючих елементів. Легуючі елементи в основному знаходяться в твердому розчині на основі заліза. Далі ближче до основи спостерігається різке зниження концентрації легуючих елементів (зона 2). Очевидно, що зона 2 являє собою перший наплавлений шар, низька концентрація елементів, в якому, пояснюється сильним змішуванням з основним металом. На підставі наведених даних можна стверджувати, що основною фазою покриття є легований мартенсит, в якому розподілено дисперсні карбіди Ti та Cr.

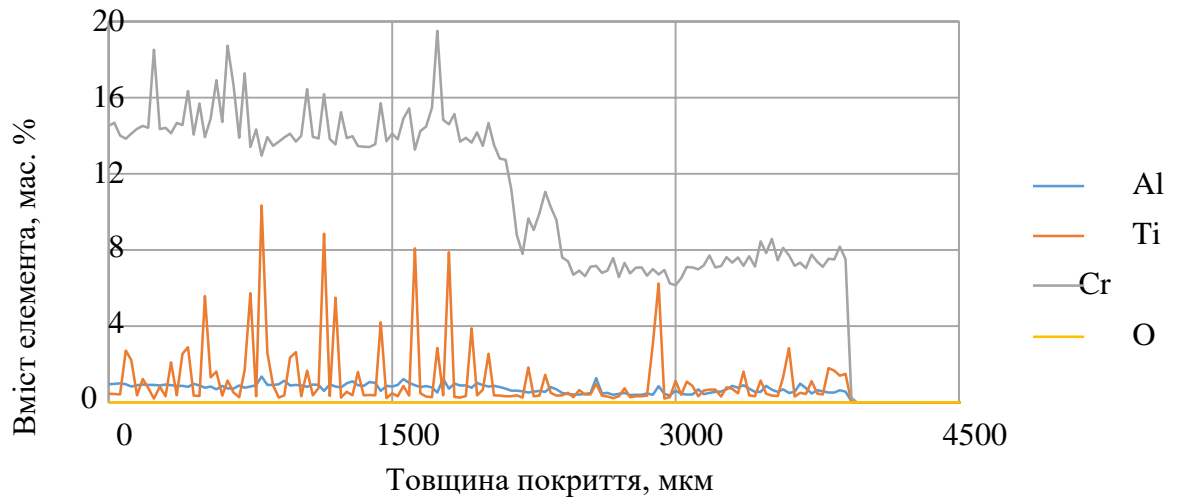


Рисунок 3.17 – Розподіл хімічних елементів за товщиною тришарової наплавки

Результати мікрохімічного аналізу підтверджуються результатами спектрального аналізу із поверхні зразків (таблиця 3.4). Видно, що в процесі напилення практично не відбувається вигорання елементів, що легують. Найвищий вміст легуючих елементів спостерігається в покритті напиленому. Зміст легуючих елементів у наплавленому шарі в середньому в 2 рази менше, ніж у напиленому, що пояснюється частковим вигоранням елементів і змішуванням з основним металом у процесі наплавлення. Виконання наплавлення в 3 шари дозволяє суттєво скоротити втрати легуючих елементів за рахунок зменшення частки участі основного металу. Найменший вміст легуючих елементів спостерігається у покритті напиленому після плазмового оплавлення. Плазмове оплавлення призвело до повного зникнення алюмінію та титану, а також до скорочення вмісту Cr та C у 2 рази. Таке різке зниження концентрації легуючих елементів після

плазмового оплавлення пояснюється кількома процесами. Присутні в покритті напиленому оксиди Ti і Al, внаслідок їх нерозчинності в розплавленому металі, в процесі плазмового оплавлення спливають в шлак. Карбіди титану, а також Ti і Al, розчинені в металевій матриці покриття, також окислюються при взаємодії з

киснем з пор та оксидів і йдуть у шлак. Основними причинами зниження концентрації C і Cr ймовірно є змішання з основним металом і вигорання, що підтверджується хімічним аналізом одношарової наплавки (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 - Хімічний склад покриттів

Тип покриття	Вміст елемента, % мас.			
	C	Cr	Al	Ti
АДМ покриття	0,77	20,04	2,18	1,56
Оплавлене покриття	0,37	8,91	0,01	0,01
Наплавлення в 1 шар	0,50	10,69	0,75	0,99
Наплавлення в 3 шари	0,77	18,62	1,23	1,74

Вихідне покриття, отримане методом АДМ, характеризується значною нерівномірністю розподілу мікротвердості за товщиною покриття, що свідчить про наявність пір, несплошностей, структурних та фазових неоднорідностей (рис. 3.18). Значення мікротвердості змінюються від 200 до 650 HV_{0,3}.

Плазмова обробка покриття призвела до його переплавлення та суттєвої зміни структури та мікротвердості (рисунок 3.18). Мікротвердість покриття значно зросла до 800 HV_{0,3}. При цьому відзначається її більш рівномірний розподіл по товщині покриття, що обумовлено однорідною структурою покриття, відсутністю оксидних прошарків, пористості та несплошностей, а також рівномірним розподілом хімічних елементів у покритті з утворенням зміцнювальних дисперсних фаз.

Однак при зниженні навантаження на індентор спостерігається

підвищення середнього значення мікротвердості від 753 HV0.3 до 831 HV0.05 (рис. 3.19). Це пояснюється наявністю, розглянутих раніше (рисунок 3.9 а), структурних мікронеоднорідностей в оплавленому покритті. При підвищенні навантаження на індентор, більше неоднорідностей потрапляє в досліджувану область, що призводить до зниження середнього рівня жорсткості. Отже, мікронеоднорідності, що спостерігаються, мають твердість нижче, ніж основний метал.

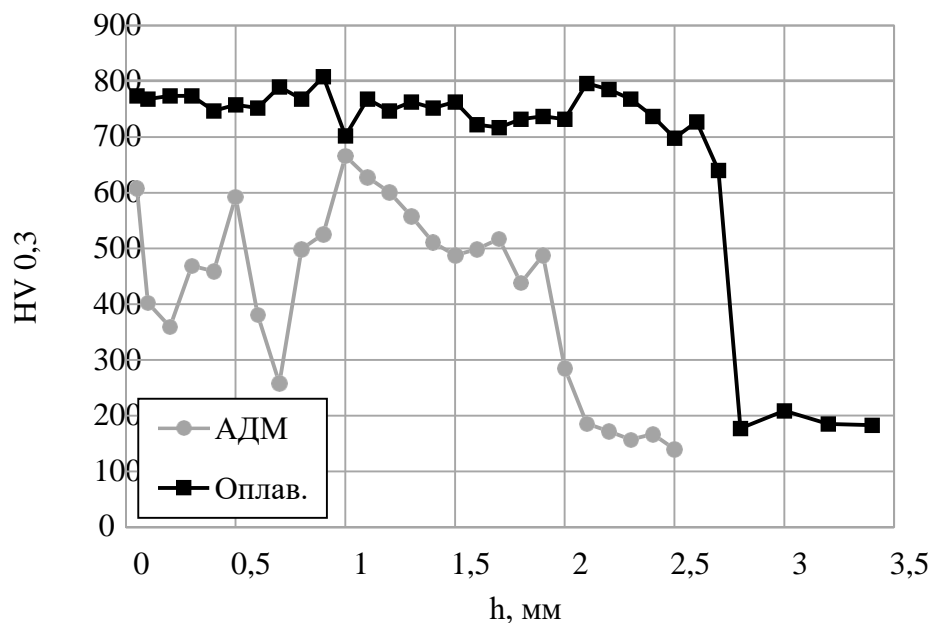
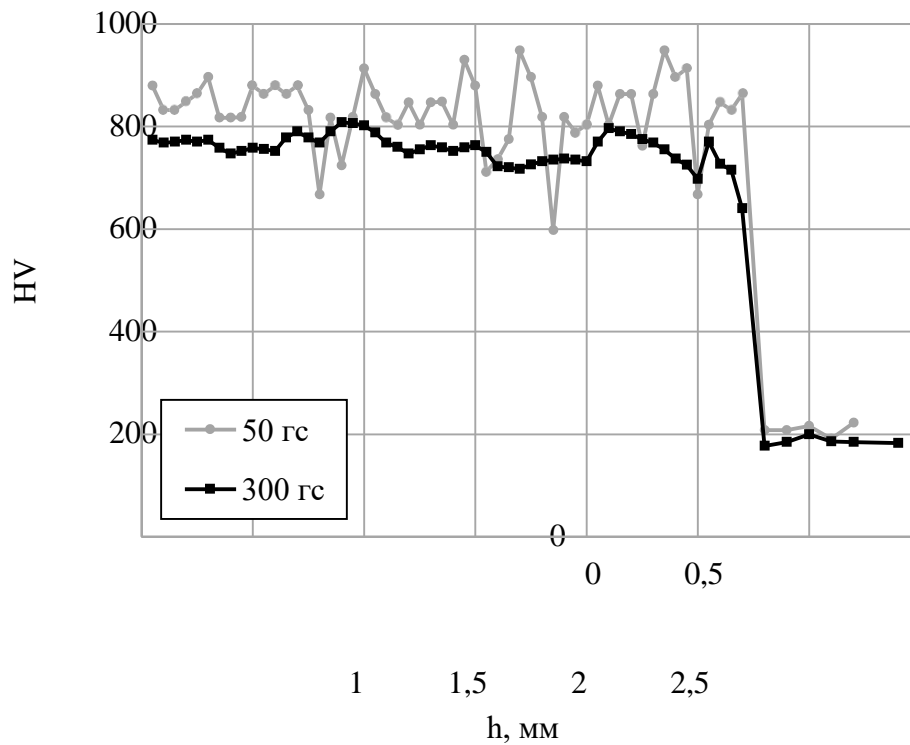


Рисунок 3.18 – Зміна мікротвердості за товщиною покриття у вихідному та оплавленому стані, при навантаженні на індентор 300 гс



3 3,5

Рисунок 3.19 – Зміна мікротвердості за товщиною покриття після плазмової обробки, при навантаженні на індентор 50 гс та 300 гс

Таке значне підвищення твердості, очевидно, пов'язане з утворенням мартенситної щільної структури покриття. Також можна відзначити, що виходячи з представлених графіків, плазмова обробка не впливає на твердість основи.

На рисунках 3.20 і 3.21 представлено зміну мікротвердості за товщиною покриття, наплавленого в один і три шари, відповідно.

Видно, що одношарове наплавлення характеризується рівномірним розподілом твердості по товщині покриття (рисунок 3.20). При переході до основного металу, який характеризується значно нижчою твердістю, мікротвердість різко зменшується, оскільки не спостерігається перехідна

зона між покриттям і підкладкою. Зміна навантаження на індентор особливого впливу на розподіл твердості не чинить, що говорить про рівномірний розподіл структурних складових по товщині наплавлення.

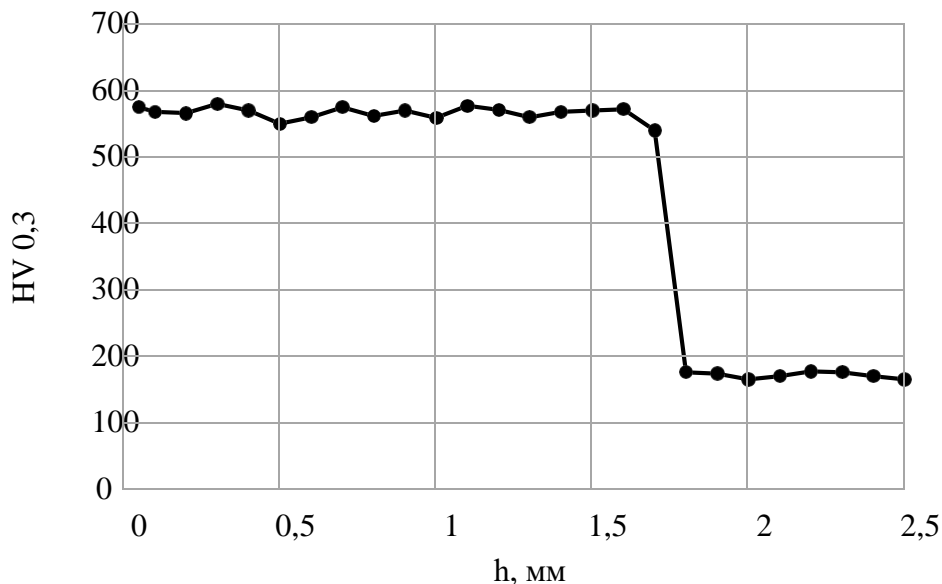


Рисунок 3.20 – Зміна мікротвердості за товщиною одношарового наплавлення при навантаженні на індентор 300 гс

По структурі у покритті виділяється дві різні зони (рисунок 3.13). Зона 1 (рисунок 3.13 а), що займає більшу частину по товщині покриття, має середню мікротвердість - 470 HV0,3 (рисунок 3.21, Зона 1).

Зона 2, внаслідок багаторазового нагріву в процесі наплавлення, відрізняється за структурою та ступенем травимості (рисунок 3.13, б). Вона характеризується дещо вищою мікротвердістю – 565 HV0,3 проти зоною 1 (рисунок 3.21, зона 2).

Зона 3 (темна смуга на рисунку 3.13 в) є перехідною зоною від покриття до основного металу і має проміжний рівень твердості 400 HV0,05 (рисунок 3.21, зона 3).

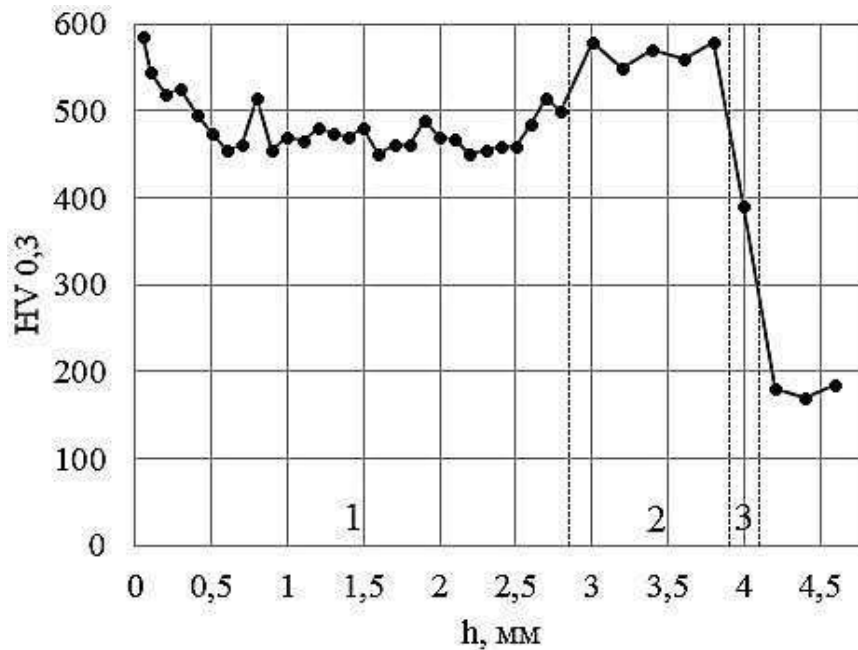


Рисунок 3.21 – Зміна мікротвердості за товщиною тришарового наплавлення при навантаженні на індентор 300 гс: 1 – Зона 1; 2 – Зона 2; 3 – Зона 3

У таблиці 3.5 наведено результати визначення середнього рівня мікротвердості всіх видів покриттів.

Таблиця 3.5 - Середня мікротвердість покриттів

Тип покриття	Мікротвердість	
	HV0,05	HV0,3
АДМ покриття	460±64	487±50
АДМ покриття після плазмового оплавлення	831±18	753±14
Наплавлення в 1 шар	576±18	571±11
Наплавлення в 3 шари	532±19	502±26

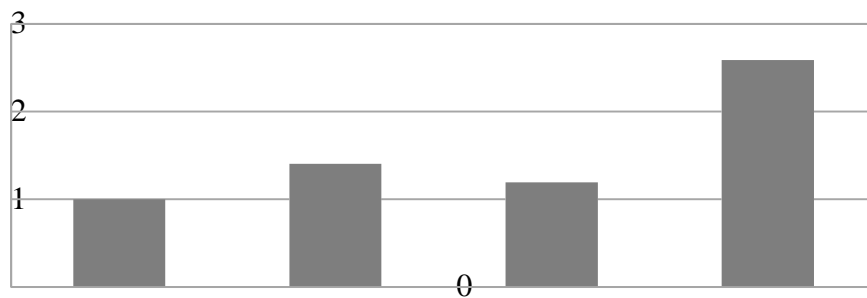
З таблиці 3.5 випливає, що найвищим рівнем мікротвердості, незважаючи на низький вміст легуючих елементів, характеризується напилене АДМ покриття після плазмової обробки, а найменшим - вихідне покриття. Плазмова обробка, що призвела до переплавлення даного покриття, сприяла усуненню пористості та оксидних фаз, наявних у

вихідному напиленому покритті, та забезпечила більш рівномірний розподіл хімічних елементів та структурних складових у покритті. Наявність в оплавленому покритті майже 9% Cr і 0,4% C, а також високі швидкості охолодження при плазмовій обробці, зумовлюють утворення структури мартенситу середньовуглецевого з включеннями дисперсних карбідів хрому. Ці фактори призвели до значного підвищення твердості напиленого методом АДМ покриття.

Незважаючи на більш високий вміст легуючих елементів у наплавлених шарах, вони мають найменшу твердість, ймовірно, це пов'язано з високим вмістом карбідоутворювальних елементів Ti і Cr. У процесі наплавлення відбувається активне утворення карбідів, що призводить до збіднення вуглецем мартенситу, що утворюється, і, отже, до зменшення його твердості. Наявність у наплавленому металі феритизаторів - Cr і Al і низького вмісту вуглецю зумовлюють наявність фериту, що має низьку твердість. Таким чином, наплавлений метал має феритно-мартенситну структуру з включеннями карбідів Ti і Cr, що пояснює низькі значення твердості отриманих наплавок.

За результатами визначення втрат маси зразків після випробувань зносостійкості за закріпленням абразивом (рисунок 3.22) найбільшу зносостійкість має покриття після плазмового оплавлення (0,1444 г), а найменшу – вихідне металізаційне покриття (0,3738 г), при цьому знос % вище зносостійкості одношарового наплавлення (0,2660 г) і в 2 рази вище зносостійкості тришарового наплавлення (0,3132 г).

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61



АДМ

Одношарова
наплавлення

Тришарова
наплавлення

Оплав.

Рисунок 3.22 – Відносна зносостійкість різних видів покриттів під час зношування за закріпленим абразивом

В умовах абразивного зносу висока зносостійкість більш однорідних оплавлених покриттів з рівномірним розподілом дисперсних зміцнювальних фаз у порівнянні з металізаційними покриттями до оплавлення може бути пов'язана з прискореним мікрорізанням останніх при попаданні абразивних частинок відносно м'які прикордонні шари і пори [1].

У той же час, при одношаровому напавленні утворюється феритно-мартенситна структура з виділенням карбідів хрому та титану по межах зерен, що зумовлює зниження твердості та зносостійкості покриття.

Виконання напавлення в 3 шари дозволяє підвищити вміст легуючих елементів у напавленому шарі, однак така концентрація Cr та Al інтенсифікує утворення фериту, що зумовлює зниження зносостійкості отриманої напавки.

На рисунку 3.23 представлені знімки поверхонь зношування зі скануючого-електронного мікроскопа, на яких простежуються відмінності

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

типу руйнування.

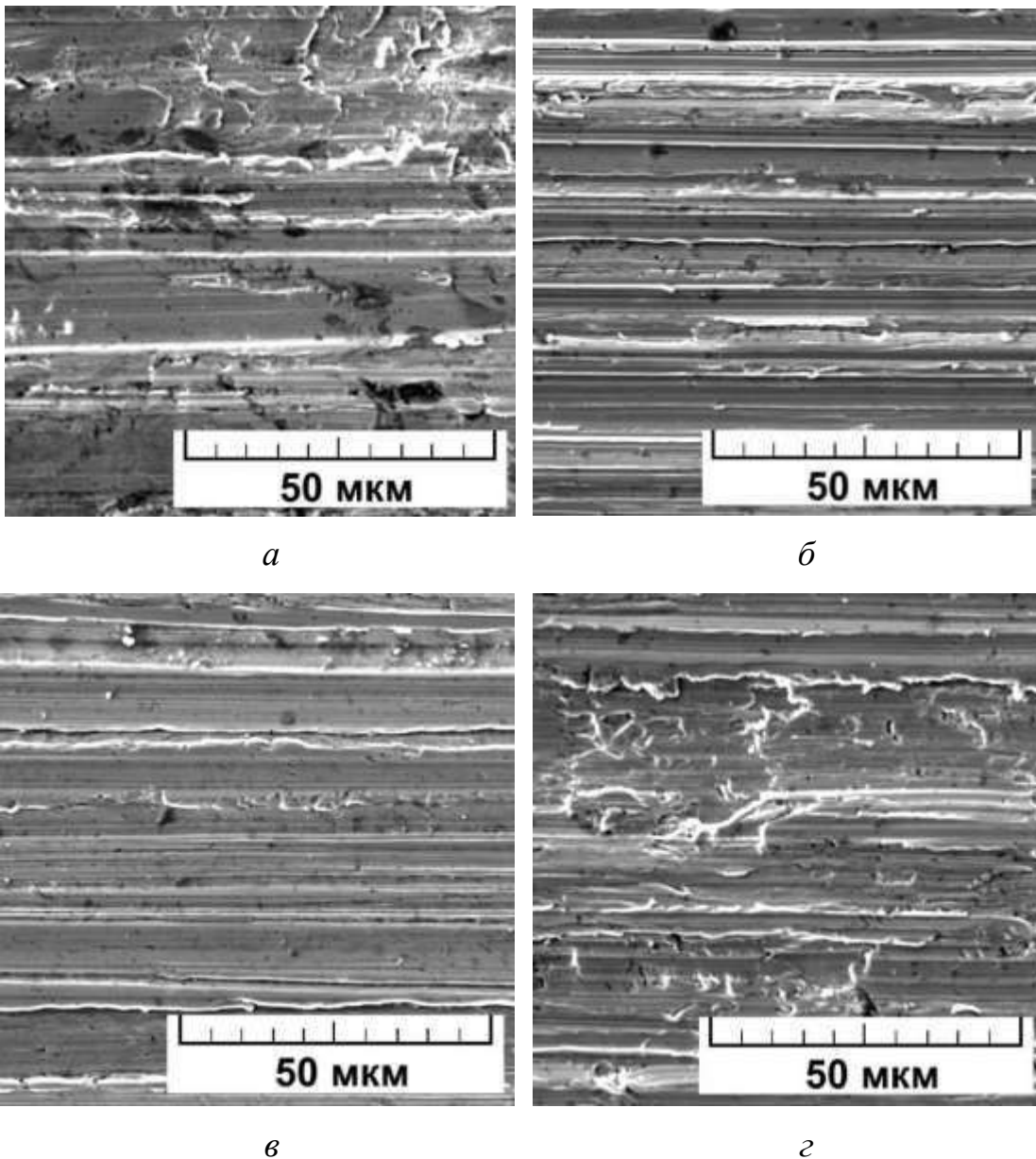


Рисунок 3.23 – Поверхні зносу: а – напилене АДМ покриття; б – покриття після плазмового оплавлення; в – одношарова наплавка; г – тришарова наплавка

Рисунок 3.23, а показує, що зношування напиленого покриття відбувається переважно за механізмом дряпання (пластичного відтискання). Про це свідчить присутність на поверхнях покриттів, що розглядаються, поряд з окремими односпрямованими западинами і виступами, пов'язаними

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

з відділенням мікростружки, випрасуваних ділянок, слідів передеформування металу і великої кількості втомних мікротріщин, пов'язаних з розвитком малоциклової фрикційної втоми. Крім глибоких подряпин спостерігається також відшарування фрагментів покриття, що говорить про їх низьку когезійну міцність, пов'язану з утворенням оксидних прошарків на міжламелярних межах. Таким чином, абразивне зношування покриття, отриманого методом АДМ, відбувається за змішаним механізмом при переважній ролі дряпання.

Зношування напиленого покриття з наступним плазмовим оплавленням, і наплавленого в 1 шар металу, відбувається за механізмом мікрорізання, що реалізується в процесі одноактного відділення об'єму мікрооб'єму металу від поверхні покриття під впливом абразивного зерна. На це вказує наявність на поверхнях зношування обох покриттів характерних слідів мікрорізання у вигляді борозен та відвалів із гострими краями, орієнтованих у напрямку руху абразивних зерен (рисунок 3.23 б, в). Розвиток механізму мікрорізання свідчить про те, що твердість використаного абразиву більш ніж в 1,3 рази перевищує твердість структурних складових оплавленого покриття та наплавленого шару.

Аналіз малюнка 3.23 г показує, що при руйнуванні металу, наплавленого в 3 шари, під впливом абразиву також спостерігається змішаний механізм зношування, оскільки на поверхнях тертя присутні як характерні ознаки мікрорізання, так і згладжені ділянки зі втомними мікротріщинами. Однак на відміну від змішаного механізму зношування напиленого покриття характерно переважання механізму мікрорізання.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

4. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТОБРОБНИХ МАШИН

На основі отриманих результатів розробляли технологічні основи плазмового оплавлення металізаційних покриттів для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Для підтвердження експериментальних даних із зносостійкості оплавлених плазмою металізаційних покриттів проведено порівняльні експлуатаційні випробування лемешів, зміцнених за запропонованою технологією.

4.1. Опис конструкції та зміцнюваного робочого органу

Як робочі органи ґрунтообробних машин для зміцнення були обрані лемеша РЗЗ П.702Б із сталі 65Г (рисунок 4.1) плуга чотирикорпусного навісного ПЛН-4-35 (рисунок 4.2). Вибір обумовлений масовим використанням робочого органу.

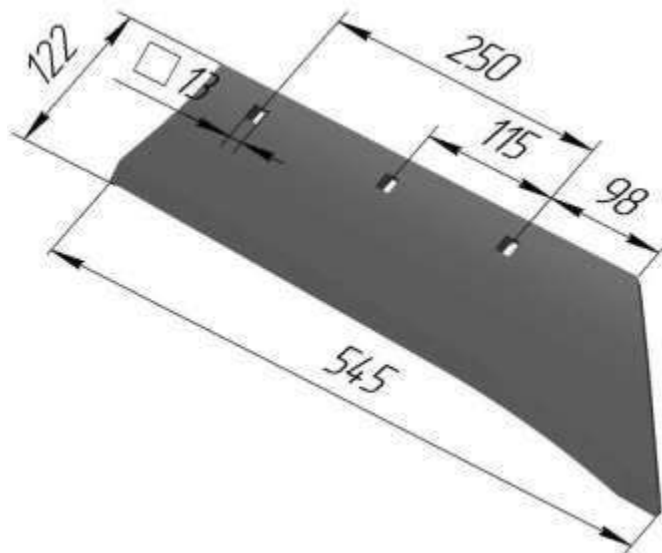


Рисунок 4.1 – Лемех плуга

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

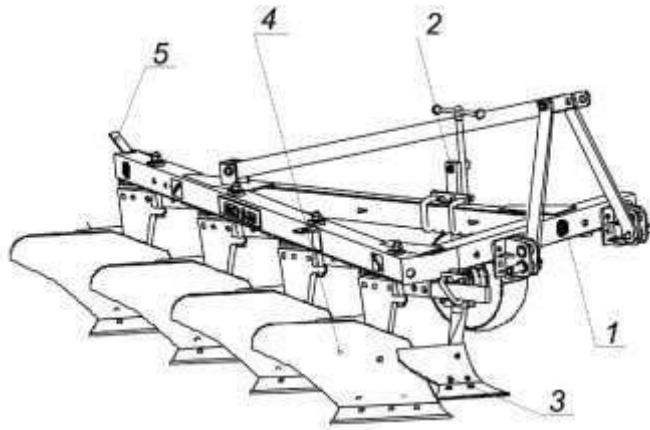
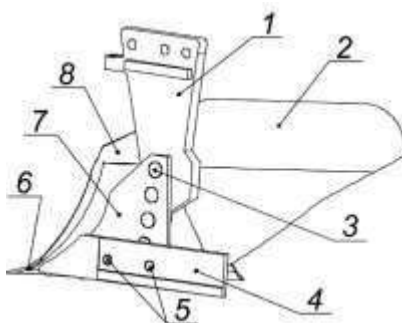


Рисунок 4.2 – Плуг чотирьох корпусний навісний ПЛН-4-35: 1 – рама; 2 – механізм колеса; 3 – передплужник; 4 – корпус; 5 – світлоповертач

Плуг призначений для оранки на глибину до 30 см під зернові та технічні культури різних ґрунтів, не засмічених камінням, плитняком та іншими перешкодами, з питомим опором до 0,09 МПа та твердістю до 3,0 МПа [111].

Для виконання основної технологічної операції - підрізання, обороту та кришення пласта призначений корпус плуга. Корпус (Рисунок 4.3) складається з черевика, стійки, грудей відвалу, крила відвалу, польової дошки та лемеша. До стійки корпусу кріпиться черевик, на якому встановлюється леміш, груди відвалу, крило відвалу, польова дошка. Польова дошка сприймає бічне зусилля, що діє на корпус плуга в горизонтальній площині, тим самим усуває його розворот і покращує стійкість ходу по ширині захвату.



					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Рисунок 4.3 – Корпус: 1 – стійка; 2 – крило відвалу; 3 – болт; 4 – дошка польова; 5 – болт із шайбою та гайкою; 6 – леміш; 7 – черевик; 8 – груди відвалу

Лемех є основним робочим органом корпусу плуга і служить для підрізання пласта та направлення його на відвал. Ресурс лемеша насамперед визначає технічний рівень плуга. У горизонтальній площині в зоні лемеша найбільший тиск зосереджений у носка, а на лезовій частині вони менші. У вертикальній площині максимальний тиск зосереджений поблизу ріжучої частини леза лемеша.

Типовий характер знос у серійних лемешів показаний рисунку 4.4 [112].

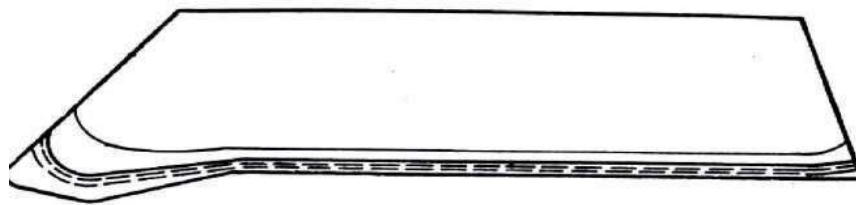


Рисунок 4.4 – Контур зносу лемеша

Тому до лемеша пред'являються особливі вимоги з погляду його конструкції, режимів термообробки та виду зміцнюючої технології як при виготовленні, так і відновленні. Застосовуваний матеріал повинен бути зносостійким, мати високу ударну в'язкість, оскільки лемеш в процесі експлуатації зазнає значних динамічних навантажень з боку абразивного середовища.

4.2.Розробка технології зміцнення

Робочі органи ґрунтообробних машин (лемішні плуги та їх елементи:

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

лемеша, груди та крило відвалу тощо) працюють в умовах абразивного зносу, ударних навантажень та впливу агресивного середовища. Їхнє зміцнення полягає у збільшенні зносостійкості функціональних робочих поверхонь. Розроблений технологічний процес зміцнення ріжучої кромки леза лемеша РЗЗ П.702Б плуга чотирикорпусного навісного ПЛН-4-35 наведено в таблиці 4.1.

Лемех з нанесеним металізаційним покриттям (рисунок 4.5) оплавляли плазмою на універсальній установці для обробки плазми.



а



б

Рисунок 4.5 – Напилений леміш: до – а після плазмового оплавлення – б

Таблиця 4.1 - Технологічний процес зміцнення лемеша

Найменування, зміст операції	Обладнання, інструмент	особливі вказівки

Очисна		
1. Очистити деталь від забруднення зануренням послідовно в розчин миючого засобу «Лабомід-203» концентрацією 20 г/л	Установка миття МД-2.	Роботи з підготовки поверхні та напилення покриття здійснювати при температурі повітря не
при температурі 90–95°C, потім у «Лабомід-10» концентрацією 20 г/л при температурі 80°C. 2. Продути деталь стисненим повітрям.		нижче плюс 5 ° С за ГОСТ 9.304-87.
Дефектувальна		
1. Виконати дефектацію лемеша за геометричними розмірами.	Перевірювальна плита 2-2-1000x630 мм; пластинчастий щуп 3-2; штангенциркуль ЩЦ-І-125-0,1; універсальний шаблон зварювальника УШС-2	Допускається короблення леза лемеша до 4, яке спинки – до 2 мм. Пластинчастий щуп 3-2. Ширина лемеша має бути не менше 92 мм. Штангенциркуль ЩЦ-І-125-0,1. Товщина ріжучої кромки леза лемеша повинна перевищувати 1 мм з відривом 0,5 мм від ріжучої кромки. Штангенциркуль ЩЦ-І-125-0,1. Кут заточування леза лемеша має бути 25...30°. Універсальний шаблон зварювальника УШС-2.
Дробеструмене ва		

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

<p>1. Зробити дробоструминну обробку поверхні лемеша шириною 25-30 мм з боку леза і ділянку 55-65 мм у носка до отримання шорсткості не менше Ra 12.5.</p> <p>2. Контролювати якість операції за зразком.</p>	<p>Камера дробоструминної поверхневої обробки STB-1200, дріб ДЧК 1, тиск повітря 0,6 МПа, кут атаки 70...90°, діаметр сопла 8 мм, дистанція 150 мм, еталон шорсткості Elcometer 125 Shot.</p>	<p>1. Стиснене повітря, що застосовується для підготовки поверхні, має бути очищене від олії та вологи та відповідати класам 0, 1, 3, 5 за ГОСТ 17433.</p> <p>Дроб за ГОСТ 11964-81</p> <p>Еталон шорсткості ISO 8503-1.</p> <p>2. Шорсткість поверхні не менше Ra 12.5 відповідно до ГОСТ 9.304-87, 28302-89.</p>
---	---	--

Слюсарна

<p>1. Встановити деталь у токарний верстат</p>	<p>Кран консольний з поворотною стрілою</p> <p>на колоні DEMAG 500, верстат токарний 1610</p>	<p>Закріпити деталь по болтовим отворам на оснастці в патрон токарного верстата</p>
--	---	---

Напилення

<p>1. Напилити на поверхню шар завтовшки 2-0,2мм. Операцію виконати не пізніше 2 годин після дробоструминної обробки.</p>	<p>Апарат АДМ-10, струм 200 А, напруга 28 В, дистанція напилення 100 мм, швидкість переміщення апарату 360 м/год, дріт ППМ-8, діаметр 2 мм, тиск газів: пропана 0,32 МПа, стиснутого повітря 0,30 МПа .</p>	<p>1. Дріт перед його застосуванням повинен бути розконсервований відповідно до вимог ГОСТ 9.014, знежирений органічними розчинниками відповідно до вимог ГОСТ 9.402.</p> <p>2. Стиснене повітря, що застосовується для напилення покриття, має бути очищене від олії та вологи та відповідати класам 0, 1, 3, 5 за ГОСТ 17433,</p>
---	---	---

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

		<p>3. Краплі діаметром згори 0,5 мм не допускаються.</p> <p>4. Безпека забезпечується під час виконання вимог за ГОСТ 12.3.008-75; 12.3.016-87; 28302-89</p>
--	--	--

Контрольна

<p>1. Контролювати зовнішній вигляд візуально.</p> <p>2. Контролювати товщину покриття за допомогою товщиноміра.</p>	<p>1. Лупа переглядова ЛП-1-10х за ГОСТ 257016-83.</p> <p>2. Ультразвуковий товщиномір ТТ100.</p>	<p>1. Неприпустима наявність частинок нерозплавленого металу, тріщин, відшарувань, здуття, слідів місцевої корозії згідно з ГОСТ 9.304-87.</p> <p>2. Контролювати товщину не менше ніж у 10 місцях згідно з ГОСТ 9.304-87, відносна похибка вимірювання $\pm 10\%$ згідно з ГОСТ 27750-88.</p>
--	---	---

Слюсарна

<p>1. Зняти деталь з токарного верстата, встановити на верстат наплавлення.</p>	<p>Кран консольний з поворотною стрілою</p> <p>на колоні DEMAG 500, наплавальний верстат У-653</p>	
---	--	--

Оплавлення

<p>Здійснити оплавлення напиленого покриття</p>	<p>Багатоцільова установка для плазмової обробки, струм 160 А, діаметр сопла 4 мм, швидкість переміщення плазмотрону 6 м/год, дистанція обробки 5 мм, витрата плазмоутворюючого газу 2,5 л/хв, витрата захисного газу 4,5 л/хв,</p>	<p>1. Виробляти послідовне оплавлення з перекриттям доріжок на 40-50%, до отримання суцільного покриття на всій лезовій частини лемеша.</p>
---	---	---

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

	крок між доріжками 4 мм	
Контрольна		
1. Контроль якості поєднання покриття з основою.	1. Ультразвуковий дефектоскоп УД2-70.	1. Контроль виконувати по периферії та торцям лемешів. 2. Обсяг УЗК 100% згідно з ГОСТ 14782-86.
Пакувальна		
1. Робочу поверхню закрити папером. Деталь укласти в тару	Папір обгортковий за ГОСТ 8273-75. Ящики дерев'яні згідно з ГОСТ 10198-91	

4.3. Експлуатаційні випробування зміцнених робочих органів ґрунтообробних машин

Експлуатаційним випробуванням піддавалися досвідчені (зміцнені за розробленою технологією) та серійні лемеша плужного корпусу зі сталі 65Г, зміцнені за двома технологіями: загартування та ТВЧ наплавлення зносостійкого сплаву Сормайт №1.

Досвідчені та серійні лемеші встановили на плуг чотирикорпусний навісний ПЛН-4-35 (рисунок 4.6) та агрегувалися з трактором ВТ-150 (150 к.с.). Кожен плуг оснащувався повним комплектом дослідних чи серійних лемешів. Така схема забезпечує максимальну точність результатів, при необхідності їх порівняння, оскільки навантаження на лемеша корпусів зменшується від першого до останнього.

Обробляли середньосуглинисті ґрунти при глибині обробки 25 см. Вологість ґрунту за період випробувань варіювалася за період випробувань у діапазоні 15–30 %. Середньодобова температура повітря 16 °С. Швидкість руху агрегату становила в середньому 7-9 км/год.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72



Рисунок 4.6 – Плуг із встановленими досвідченими лемешами

Первинну технічну експертизу серійних робочих органів після об'ємного загартування, ТВЧ наплавлення сормайтотом та дослідних з оплавленим плазмою металізаційним покриттям проводили за ОСТ 10.2.1-97 для подальшого визначення величини зносу. Розміри робочих органів контролювали за параметрами, вказаними рисунку 4.7. Випробування проводили до досягнення кожним робочим органом граничного стану.

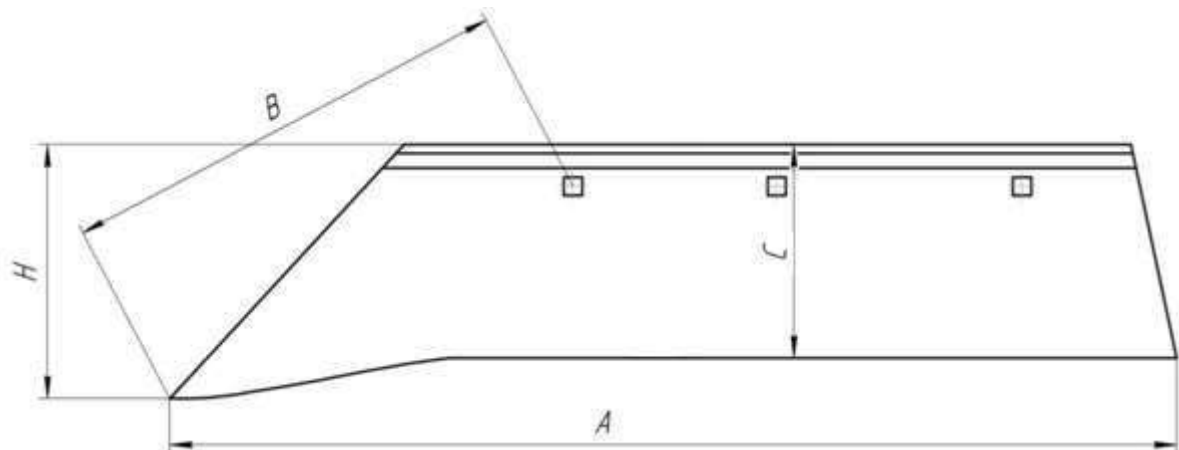


Рисунок 4.7 – Контрольовані параметри лемешів

Параметрами, визначальними поточний стан робітника органу, була лінійне зношування носка і лезової частини, а також втрата маси. Дані

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

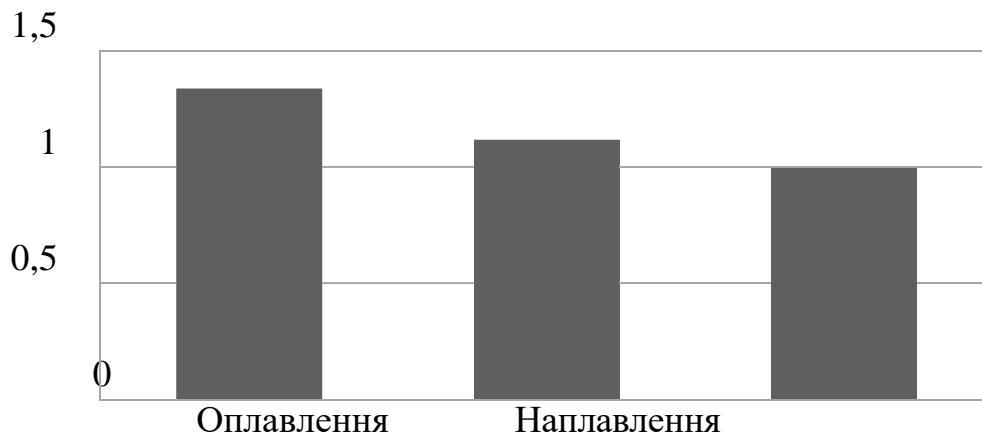
параметри контролювали в кінці кожної зміни, при цьому робочі органи знімали з машини та очищали від залишків ґрунту за допомогою металеві щітки. Зважування виконували на терезах CASED-H-15 з похибкою вимірювання маси 0,5 г. Лінійне зношування вимірювали штангенциркулем ЩЦ-I-125-0,1 з точністю 0,1 мм. За критерії вибракування прийняті граничне лінійне зношування по довжині носка 52 мм, по ширині лезової частини 30 мм, граничне масове зношування 850 г.

Експлуатаційні випробування показали, що ресурс серійного лемеша, підданого об'ємному загартуванню, при оранці середньосуглинистих ґрунтів становить до 8–9 га, після чого настає граничне масове зношування (таблиця 4.2). Втрати маси одного досвідченого лемеша при напрацюванні 9,2 га склали 618 г, тоді як втрати маси серійного, загартованого лемеша, при тому ж напрацюванні, склали 919,5 г, а для лемеша з ТВЧ наплавленням зносостійкого сплаву Сормайт

– 823 г. Повна напрацювання дослідного лемеша склала 11,5 га. Таким чином, плазмове оплавлення напиленого на леміх металізаційного покриття системи Fe-C-Cr-Ti-Al дозволяє підвищити його ресурс на 34%, тоді як ТВЧ наплавлення сормайту лише на 12% (рисунок 4.8).

Таблиця 4.2 - Втрата маси лемешів за результатами випробувань

Технологія зміцнення	Початкова маса, г	Напрацювання 0,7 Га / втрата маси, г	Напрацювання 1,7 Га / втрата маси, г	Напрацювання 3,2 Га / втрата маси, г	Напрацювання 9,2 Га / втрата маси, г
Оплавлення (досвідчений)	3904	3844,5 / 59,5	3761 / 143	3633 / 271	3216 / 688
Наплавлення (серійний)	4157	4095,5 / 61,5	3992,5 / 164,5	3856 / 301	3334 / 823
Загартування (серійний)	4215,5	4178 / 37,5	4099 / 116,5	3872 / 343,5	3296 / 919,5



Загартування

Рисунок 4.8 – Відносна зносостійкість лемешів

Інтенсивність лінійного зносу (таблиця 4.3) серійного лемеша, підданого об'ємному гартуванню, по довжині носіння склала 4,56 мм/га (Рисунок 4.9, а), а зміцненого за розробленою технологією 1,95 мм/га (Рисунок 4.9, в). У той же час інтенсивність лінійного зносу серійного лемеша по ширині лезової частини склала 0,65 мм/га, а зміцненого за розробленою технологією 0,32 мм/га. Максимальний лінійний знос робочих органів спостерігається по довжині носка і лезової частини, отже, в процесі експлуатації максимальним навантаженням схильний саме носок лемеша. Можна відзначити, що при відбракуванні лемешів через досягнення граничного масового зносу жоден з них не досяг граничного лінійного зносу. З одного боку, отримані дані корелюють з величиною масового зносу лемешів, а з іншого свідчать про те,

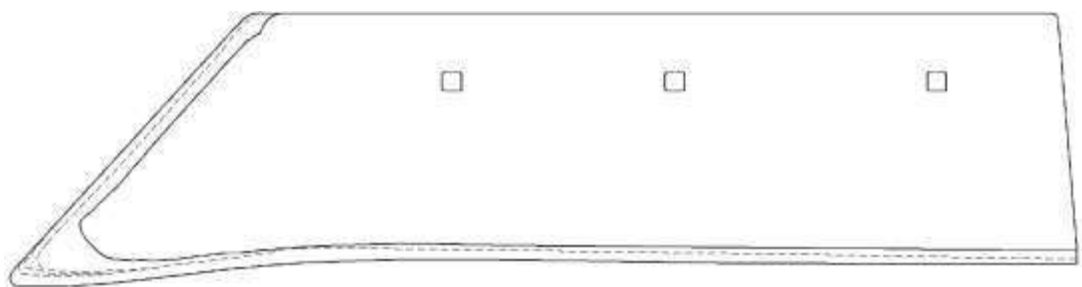
Через інтенсивне зношування ріжучої кромки леза серійного лемеша при роботі плуга на середньосуглинистому ґрунті його носок затуплюється і набуває округлої форми. Це, у свою чергу, призводить до підвищення тягового зусилля плуга, порушення технологічного процесу оранки і, відповідно, збільшення питомої витрати палива при зниженні продуктивності роботи плуга.

Таблиця 4.3 – Зміна контрольованих параметрів лемешів за результатами випробувань

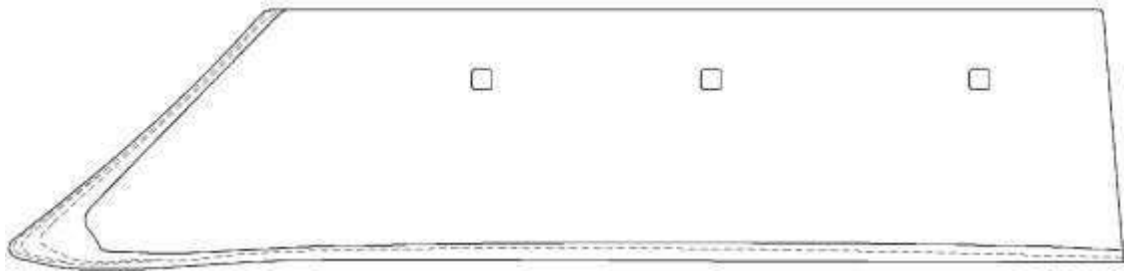
Тех-я	Контрольовані параметри (рисунок 4.7), мм											
	А			У			З			Н		
	Поч	Кон	Різн	Поч	Кон	Різн	Поч	Кон	Різн	Поч	Кон	Різн
Оплав.	543	523	20	243	225	18	121	118	3	130	120	10
Наплав.	545	507	38	243	205	38	120	110	10	130	115	15
Загартування	540	503	37	245	203	42	124	118	6	140	116	24

При об'ємному загартуванні серійного лемеша зі сталі 65Г досягається твердість металу до 50 HRC. Але зносостійкість таких робочих органів нижча, порівняно з аналогічними деталями, виготовленими за розробленою технологією через те, що на суглинистих ґрунтах не відбувається їх самозагострення. Так, після проведення експлуатаційних випробувань встановлено, що кут заточування леза серійного лемеша становить 30–33° (Рисунок 4.10, а, б), а у лемеша з оплавленим плазмою металізаційним покриттям – 23–25° (Рисунок 4.10, в, г), при початковому куті заточування 22-25°.

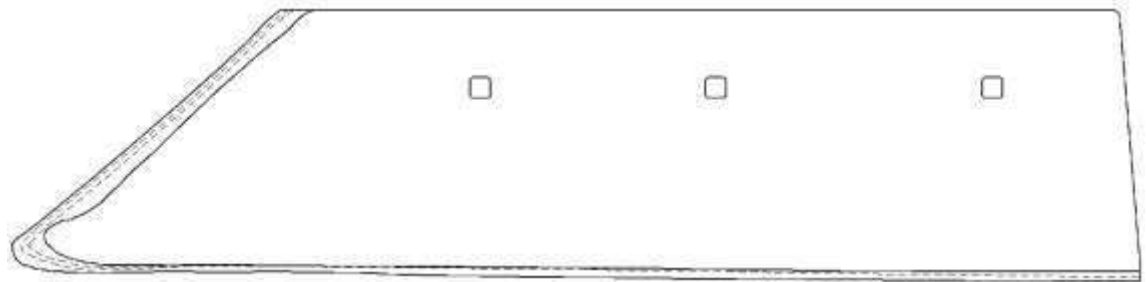
Експлуатаційні випробування зміцнених лемешів плуга чотирьокорпусного навісного ПЛН-4-35 з оплавленим плазмою металізаційним покриттям, підтвердили результати лабораторних випробувань та довели переваги розробленої технології підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.



a



б



в

Рисунок 4.9 – Епюри інтенсивності лінійного зносу шкарпетки та лезової частини лемешів: а – серійний; б – з наплавленням металом Сормайт №1; в – зміцнений за розробленою технологією



a



б

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77



б



г

Рисунок 4.10 – Кут заточування лезової частини лемешів за результатами експлуатаційних випробувань: а, б – внутрішня та зовнішня поверхня серійного лемеша відповідно; в, г – внутрішня та зовнішня поверхня дослідного лемеша відповідно.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

ВИСНОВКИ

1. Показано, що для підвищення зносостійкості покриттів найбільше ефективно використання подальшого плазмового оплавлення, однак, така обробка стримується внаслідок відсутності технологічних рекомендацій стосовно обробки матеріалів з високою температурою плавлення.

2. Для визначення параметрів режиму обробки розроблено модель поширення тепла у двошаровій композиції "покриття - основа" під впливом плазмового джерела нагріву. Параметри режиму плазмової обробки визначені за критерієм максимального коефіцієнта форми проплавлення підкладки.

3. Встановлено, що оплавлене покриття складається з чотирьох зон. Зона, що примикає до основної сталі, товщиною 50-150 мкм, складається з дрібних рівноосних зерен, над нею розташовується зона товщиною до 50-100 мкм зерен мартенситу. Далі йде основний шар товщиною 1500-2000 мкм витягнутих стовпчастих зерен мартенситу та верхньої частини покриття, товщиною до 500 мкм, що складається з рівноосних зерен розміром 20-50 мкм.

4. Показано, що утворення щільної структури дрібнодисперсного мартенситу призводить до підвищення його мікротвердості в 1,5 рази порівняно з металізаційним покриттям до оплавлення.

5. Встановлено, що зносостійкість оплавлених плазмою покриттів в 2,5 рази вище, ніж у металізованих покриттів до оплавлення і в 1,4 рази вище зносостійкості шару, виконаного аргонодуговим наплавленням з того ж порошкового дроту.

6. Встановлено, що зноси зразків з металізаційним покриттям після випробувань пов'язані зі змішаним механізмом зношування, що

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

характеризується механізмами дряпання та відшарування ділянок покриття з низькою міцністю когезійної при потраплянні абразивних частинок в прикордонні шари і пори покриття.

7. Розроблено технологічний процес зміцнення економнолегованих металізаційних покриттів системи Fe-Cr-C-Ti-Al шляхом плазмового оплавлення стосовно лемеш пуга.

8. За результатами експлуатаційних випробувань встановлено, що ресурс зміцнених за розробленою технологією лемешів при обробці суглинних ґрунтів на 34 % вищий у порівнянні з серійним лемешом із сталі 65Г після об'ємного загартування.

9. Встановлено, що кут заточування леза лемеша з оплавленим плазмою металізаційним покриттям зберігся після експлуатаційних випробувань, що вказує на наявність ефекту самозаточування.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хрущов, Тертя, знос та мікротвердість матеріалів. Вибрані роботи (до 120-річчя від дня народження)/ Хрущов; відп. ред. І.Г. Горячів. - : , 2012. - 512 с.
2. Єлагіна, О.Ю. Технологічні методи підвищення зносостійкості деталей машин. Навчальний посібник / О. Ю. Єлагіна - : Логос, 2009. - 488 с.
3. Чичінадзе, А.В. Основи трибології (тертя, знос, мастило) / А.В. Чичінадзе, Е.Д. Браун, Н.А. Буше та інших. – : Машинобудування, 2001. – 664 з.
4. Шпилько, Ю.А. Методика визначення економічної ефективності технологій та сільськогосподарської техніки / Ю.А. Шпилько, С. Баринів. - : Наука, 1993. - 185с.
5. Костецький, Б.І. Про роль кисню при терті ковзання/Б.І. Костецький, І.Г. Носовський, Л.В. Нікітін // Машинознавство. 1965. № 6. С. 115-118.
6. Синеоков, Г. П. Теорія та розрахунок ґрунтообробних машин / Г. П. Синеоков, І. Панов. - : Машинобудування, 1977. - 328 с.
7. Бернштейн, Д.Б. Лемехи плугів. Аналіз конструкцій, умов зношування та застосування матеріалів / Бернштейн Д.Б., Ліскін І.В. // Сільськогосподарські машини та знаряддя. Серія 2. Вип. 3. 1992. С. 35.
8. Лялякін, В.П. Стан та перспективи зміцнення та відновлення деталей ґрунтообробних машин зварювально-наплавочними методами / В.П. Лялякін, С.А. Соловйов, В.Ф. Аулов // Праці ДЕРЖИТИ. 2014. том 115. - С. 96-104.
9. Виноградов, В.І. Дослідження роботи зубчастих лемешів // Підвищення довговічності робочих деталей ґрунтообробних машин. -: Машгіз, 1960. С. 62-79.
10. Василенко, Н. А. Перспективи застосування локального

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

зміцнення при виготовленні та відновлені робочі органи // Техніка АПК
Випуск 1, 2008. С. 29–31.

11. Ткачов, В. Працездатність деталей машин в умовах абразивного зношування/В. Ткачев. - : Машинобудування, 1995. 336 с.

12. Белінін, Д.С. Плазмова поверхнева обробка високолегованих сталей струмом зворотної полярності / Д.С. Белінін, Ю.Д. Щіцин // Зварювання та діагностика: збірка доповідей міжнародного форуму, 2015. С. 28-34.

13. Огризков, Є.П. Ефективність використання лемешів/Є.П. Огризков, Г.І. Лежнев // Трактори та сільгоспмашини, 1972. № 2. С. 18-20.

14. Виноградов, В. Ударно-абразивне зношування бурових доліт / В. Виноградов, Г. Сорокін, Г.К. Шрейбер. - : Надра, 1975. 167 с.

15. Машков, Ю.К. Тертя та модифікація матеріалів трибосистем / Ю.К. Машков, К. Полещенко, С. Поворознюк, П.В. Орлів. - : Наука, 2000. 280 с.

16. Костецький, Б.І. Поверхнева міцність матеріалів під час тертя / Костецький Б.І., Носовський І.Г., Караулов А.К. та ін – К.: Техніка, 1976. 296 с.

17. Косилов, А.І. Плазмова наплавка деталей порошковими композиціями // Техніка сільському господарстві, 1983. № 1. З. 30–32.

18. Ткачов, В. Індукційна наплавка твердих сплавів/В. Ткачов, Б. фіштейн. Н.В. Казинцев, Д.А. Алдирєв. - : Машинобудування, 1970. - 182 с.

19. Микитянський, В.В. Боротьба з корозією шляхом високошвидкісного газотермічного напилення / В.В. Микитянський, Р. Велес Парра, А.Р. Велес-Пивоваров // Вісник АГТУ, 2006. № 2. - С. 95-101.

20. Хасу, А. Наплавлення і напилення / Хасу А., Морігакі О. - : Машинобудування, 1985. 240 с.

21. Балдаєв, Л.Х. Газотермічне напилення: навч. допомога. - :

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

Маркет ДС, 2007. 344 с.

22. Витязь, П.А. Структура та властивості покриттів із сталі 40X13, отриманих з використанням різних методів газотермічного напилення / П.А. Витязь, А. Білоцерківський, В.А. Кукареко та ін. // Фізична мезомеханіка. 2002. № 5. С. 29-36.

23. Харламов, Ю.А. Газотермічне напилення покриттів та екологічність виробництва, експлуатації та ремонту машин // Важке машинобудування. 2000. № 2. С. 10-13.

24. Коробів, Ю.С. Ефективність застосування активованої дугової металізації для нанесення захисних покриттів // Зварювальне виробництво. 2005. № 2. С. 47-49.

25. Похмурський, В. І. Структура та триботехнічні характеристики покриттів, отриманих електродуговою металізацією з використанням порошкового дроту / В. І. Похмурський, Студент, В. Довгунік та ін. // Автоматичне зварювання. 2003. № 8. С. 13-17.

26. Bach, Fr.-W. Modern Surface Technology/Fr.-W. Bach, A. Laarmann, T. Wenz., 2006. - 346 pp.

27. Похмурський, В. І. Порошкові дроти систем FeCrB+Al та FeCrB+Al+C для електродугової металізації / В. І. Похмурський, Студент, В. Довгунік та ін. // Автоматичне зварювання. 2002. № 3. С. 32-35.

28. Коробов, Ю. Metastable austenite type Core Wire для Arc Spraying - моделювання каналу трансляції в кінці і coating structure analysis / Yu. Коробов, Філіппов, А. Белозерцев, С. Невезін, В. Шиміяков // Proc. of ITSC 2010, ASM International: Singapore, 2010.

29. Olson, GB mechanismus for strain-induced nucleation of martensitic transformations / GB Olson, MA Cohen // Journal of Less-Common Metals, 28 (1972). P. 107-118.

30. Марукович, Є.І. Зносостійкі сплави/Є. І. Марукович, І. Карпенко. - : Машинобудування, 2005. 428 с.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

31. Коробов, Ю.С. Кінетика взаємодії напилюваного матеріалу з киснем при електродуговій металізації / Ю.С. Коробов, В. Бороненків // Зварювальне виробництво. 2003. № 7. - С. 30-36.

32. Анциферов В. Порошкова металургія та напилені покриття / В. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинін та інших. : Металургія, 1987. – 792 з.

33. Pierre, L. Fauchais. Thermal Spray Fundamentals. Від Півдня до Part / Pierre L. Fauchais, Joachim VR Heberlein, Maher I. Boulos, 2014, 1566 p.

34. Бобров, Г.В. Нанесення неорганічних покриттів (теорія, технологія, обладнання)/Г.В. Бобров, А.А. Ільїн. - : Інтернет Інжиніринг. 2004. 624 с.

35. Утенков, В. Дослідження триботехнічних характеристик перспективних зносостійких плазмових покриттів при терті ковзання без змащення / В. Утенков, О. Зайцев // Вісті вищих навчальних закладів. Машинобудування. 2013. № 11. - С. 81-89.

36. Винокуров, Г.Г. Структура та властивості газотермічних покриттів із порошкових дротів та їх вплив на процеси зношування при терті ковзання / Г.Г. Винокуров, Н.Ф. Стручков та ін. // Фізична мезомеханіка, 2007. - № 4. том 10. - С. 97-105.

37. Pokhmurs'ka, N. Effect of laser fusion electrometallized coatings of Fe-Cr-B-Al system on their corrosion resistance / N. Pokhmurs'ka, N. Chervins'ka, M. Student, Kh. Zadorozhna // Materials Science. – Vol. 42. No. 6. 2006.

- P. 837-842.

38. Кудінов, В.В. Плазмові покриття. М: Наука. 1977, 184 с.

39. Sukhpal, SC Відомості про похід в термічному різьблені coatings / Singh Chatha Sukhpal, S. Sidhu Hazoor, S. Sidhu Buta // Національна конференція з питань розбудови та майбутніх тенденцій в механічних та матеріалах архітектури (Ост. 7–8, 2011).

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

40. Knuuttila, J. Sealing Thermal Spray Coatings by Impregnation / J. Knuuttila, P. Sorsa, T. Mäntylä // Journal of Thermal Spray Technology, Volume 8(2) June 1999. – P. 249–257.
41. Кудінов, В. В. Нанесення покриттів плазмою / В. В. Кудінов, П. Ю. Пекшев, В. Є. Білащенко та ін - : Наука, 1990. 480 с.
42. Geoffroy Berard. Influence of Sealing Treatment on Behavior of Plasma-Sprayed Alumina Coatings Operating in Extreme Environments / Geoffroy Berard, Patrice Brun. // Journal of Thermal Spray Technology. Volume 17(3) September 2008. – P. 410–419.
43. Leivo, E. Wear and Corrosion Properties of Plasma Sprayed Al₂O₃ and Cr₂O₃ Coatings Sealed by Aluminum Phosphates / E. Leivo, M. Vippola, P. Sorsa, P. Vuoristo, T. Mäntylä // J. Therm. Spray Technol. Vol 6 (No. 2). 1997. - P. 205-210.
44. Ito, H. Infiltration of Copper в Titanium-Molybdenum Spray Coatings / H. Ito, R. Nakamura, M. Shiroyama // Surf. Eng. Vol 4 (No. 1). 1988. - P. 35-38.
45. Jingjing, Чжан. Діяльність резиденції на корозійній рецидиві плазми-спрей NiCrAl/Cr₂O₃-8 wt.% TiO₂ Coating / Jingjing Zhang, Zehua Wang, Pinghua Lin // Journal of Thermal Spray Technology. Volume 20(3) March 2011. P. 508-513.
46. Gil, L. Діяльність по Post-Heat Treatment на коррозійній репресії з NiWCrBSi HVOF Coatings в Хлорид Solution / L. Gil, MA Prato, MH Staia // Journal of Thermal Spray Technology. Volume 11(1) March 2002. – P. 95–99.
47. Клеменов, В.А. Дослідження структури та властивостей нікелевих порошкових покриттів після оплавлення / В.А. Клеменов, В.Є. Панін, В.П. Безбородів та ін. // Фізика та хімія обробки матеріалів. 1997. № 6. - С. 68-75.
48. Zhang, SH Improvement на HVOF sprayed Diamalloy coatings за Laser irradiation. Applied physics A (2012) 108. P. 201-209.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

49. Геллер, А. Дослідження теплових режимів термічної обробки газотермічних покриттів/А. Геллер, Є.В. Кремко, І.Л. Купріянов та ін.// ФХО 1986. № 6. - С. 24-27.

50. Chong, Cui. Laser surface remelting of Fe-based alloy coatings вказаний HVOF / Chong Cui, Fuxing Ye, Guirong Song // Surface & Coatings Technology 206 (2012) 2388–2395.

51. Rakhes, M. Improvement of Corrosion Performance of HVOF MMC Coatings by Laser Surface Treatment / M. Rakhes, E. Koroleva, Z. Liu // Surface & Coatings Technology 200 (2010). – 531–534.

52. Shi-Hong Zhang. Characterization of microstructure and surface properties of hybrid coatings of WC-CoCr prepared by laser heat treatment and high velocity oxygen fuel spraying / Shi-Hong Zhang, Tong-Yul Cho // Materials characterization 59 (2008). - P. 1412-1418.

53. Соснін, Н.А.Плазмові технології / Н.А. Соснін, С.А. Єрмаков, П.А. Тополянський / / Зварювання, нанесення покриттів, зміцнення. - : Машинобудування. 2008. - 406 с.

54. Лецинський, Л.К. Плазмове поверхнєве зміцнення/Л.К. Лецинський, С.С. Самотугін, І.І. Пірч, В.І. Комар. - К.: Техніка, 1990. - 109 с.

55. Лащенко, Г.І. Плазмове зміцнення та напилення. - К.: "Екотехнологія". 2003. 64 с.

56. Нікітін, Д. Теплозахисні та зносостійкі покриття деталей дизелів / Нікітін Д., Кулик А. Я., Захаров Н. І. Л.: Машинобудування, 1977. 168 с.

57. Сидоров, А.І. Відновлення деталей машин напиленням та наплавлення - : Машинобудування. 1987. 192 с.

58. Рикалін, НН Лазерна та електронно-променева обробка матеріалів / НН Рикалін, АА Углов, І.В. Зуєв, О. Кокор. - : Машинобудування, 1985. -

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

496 с.

59. Резніков О., Резніков Л.А. Теплові процеси у технологічних системах. М: Машинобудування, 1990. 288 с.

60. Язовських, В. Побудова теплових моделей при зварюванні методом функцій Гріна // Вісник ПДТУ. Зварювання. Перм, 2002. - С. 25-48.

61. Полянін, А.Д. Довідник з лінійних рівнянь математичної фізики. : Фізматліт, 2001. - 576 с.

62. Поляков, С.П. Щільність струму та потоку енергії на анодній плямі аргонної та азотної дуг / С.П. Поляков, П.Ф. Буланій // Теплофізика високих температур. Т. 21, вип. 2, 1983. - С. 246 - 248.

63. Резніков, О. Обробка металів різанням із плазмовим нагріванням / О. Резніков, А. Шатерін, В.С. Кунін, Л.А. Резніков. За заг. ред. О. Резнікова. - : Машинобудування, 1986. - 232 с.

64. Рикалін, Н. Теплові характеристики взаємодії плазмового струменя з тілом, що нагрівається / Н. Рикалін, І.Д. Кулагін, А.В. Миколаїв // Автоматична зварювання, 1963. № 6. - З. 3

65. Кліменов, В.А. Дослідження теплової дії електронного пучка на композицію покриття-основа / В.О. Кліменов, Ж.Г. Ковалевська, А.Ю. Єрошенко, Д.В. Губарків // Зварювальне виробництво. 2002. № 6. С. 20-23.

66. Кречмар, Е. Напилення металів, кераміки та пластмас: пров. з ни / Е. Кречмар, Г. Шварц; пров. Є. Стрельцова, Д. Н. Маневич; ред. Є. Морозов, І. А. Немковський. - : Машинобудування, 1966. 432 с.

67. Бучаков, С.В. Методика визначення теплопровідності газотермічних покриттів/С.В. Бучаков, Ю.І. Євдокименко, К.Б. Ісаєв, В. Кисіль та ін // Вісник двигунобудування. 2011. № 2. - С. 31-35.

68. Конищев, Б.П. Розрахунок теплофізичних коефіцієнтів сталей за їх хімічним складом та температурною залежністю теплофізичних властивостей кольорових металів / Б.П. Конищев, К.Б. Конищев // Праці НДТУ і Р.Є. Алексєєва №5 (102). 2013. - С. 31 - 36.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

69. Самсонов, Г.В. Фізико-хімічні властивості оксидів. Самсонов Г.В., Борисова А.Л. та ін Довідник. Вид-во "Металургія", 1978. - 472 с.

70. Плінер, Ю.Л. Металургія хрому/Плінер Ю.Л., Ігнатенко Г.Ф., Лаппо С.І. : Металургія, 1965. - 362 с.

71. Атлас шлаків. справ. вид. : Металургія, 1985. - 208 с.

72. Патент № 2309825, 10.11.2007. Плазмотрон // Щіцин Ю.Д., Косолапов О.А., Щіцин В.Ю., Бюл. №31.

73. Патент № 2259262, 27.08.2005. Плазмотрон // Щіцин Ю.Д., Косолапов О.А., Щіцин В.Ю., Бюл. №24.

74. Патент № 2532215, 27.10.2014. Пристрій для отримання металевих порошків // Кучов П.С., Белінін Д.С., Струков Н., Щіцин Ю.Д., Бюл. №30.

75. Гуляєв, А.П. Металознавство: підручник для вузів/А. П. Гуляєв, А. А. Гуляєв. - : Альянс. 2011. - 643 с.

76. Денисенко, І. Знос та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин / Денисенко І., Опальчук О.С. // Вісник ТНТУ. 2011. Спецвипуск. Ч. 2. С. 201-210.

					МРТАМ 22.17129.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88