

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра процесів, машин і обладнання в агроінженерії

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ДАНИЛЮК ІЛЛЯ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 631.31

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Розробка технології модифікації зносостійких покриттів в
процесі плазмово-порошкового наплавлення**

208 “Агроінженерія”

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

_____ І.В. Данилюк

Керівник роботи

Р.С. Грудовий

к.т.н., ст. викладач

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Данилюк Ілля Володимирович. Розробка технології модифікації зносостійких покриттів в процесі плазмово-порошкового наплавлення. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

В магістерській роботі, в результаті комплексних досліджень структури немодифікованих і модифікованих покриттів методами світлової, електронної растрової, просвічуваної електронної мікроскопії, визначення бала зерна, рентгеноструктурного аналізу, визначення внутрішніх напружень і скалярної щільності дислокацій в покриттях показано однозначно позитивний вплив введення нанорозмірного Al_2O_3 модифікатора на структурні зміни в захисних покриттях.

При наплавленні композиційними матеріалами, що містять модифікатор, забезпечується формування карбідонасиченої структури, що має приблизно вдвічі більші показники мікротвердості.

Необхідно особливо відзначити, що при випробуваннях на ударну в'язкість та абразивну стійкість вміст модифікатора близько 1% зумовив найбільші показники стійкості.

Таким чином, дослідження мікроструктури та механічних властивостей захисних покриттів підтверджують, що раціональним змістом підвищення стійкості композиційних покриттів системи Ni-Cr-B-Si-Fe/WC є 1,0% мас. у композиційному матеріалі ПС-12НВК-01, що необхідно для забезпечення кращих показників при експлуатації сільськогосподарського обладнання із захисними покриттями в умовах ударно-абразивного зношування.

Ключові слова: плазмове наплавлення, ударно-абразивне зношування, композиційні покриття, зносотійкість.

ANNOTATION

Danilyuk Ilya Vladimirovich. Development of technology for modification of wear-resistant coatings in the process of plasma-powder surfacing. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

In the master's thesis, as a result of complex studies of the structure of unmodified and modified coatings by light, electron scanning, transmission electron microscopy, determination of grain score, X-ray diffraction analysis, determination of internal stresses and scalar density of dislocations in coatings shown unambiguously. in protective coatings.

When surfacing with composite materials containing a modifier, the formation of a carbide-saturated structure is provided, which has approximately twice the microhardness.

It should be noted that when tested for toughness and abrasion resistance, the modifier content of about 1% caused the highest resistance.

Thus, studies of the microstructure and mechanical properties of protective coatings confirm that the rational content of increasing the stability of composite coatings of the Ni-Cr-B-Si-Fe / WC system is 1.0 wt%. in the composite material ПС-12HBK-01, which is necessary to ensure the best performance in the operation of agricultural equipment with protective coatings in the conditions of shock-abrasive wear.

Key words: plasma surfacing, shock-abrasive wear, composite coatings, wear resistance.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АЛГОРИТМ РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЇ МОДИФІКУВАННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ У ПРОЦЕСІ ПЛАЗМОВНО-ПОРОШКОВОГО НАПЛАВАННЯ. ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	8
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НАПЛАВОЧНОГО МАТЕРІАЛУ ПС-12НВК-01 ТА СУМІШШЮ ПС-12НВК-01 З НАНОРОЗМІРНИМ Al_2O_3	20
РОЗДІЛ 3. МЕТАЛОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАНОРОЗМІРНОГО МОДИФІКАТОРА НА СТРУКТУРУ НАПЛАВЛЕНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ.....	30
ВИСНОВКИ.....	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	44

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. У багатьох виробках застосування дорогих матеріалів зі спеціальними властивостями у всьому об'єму виробу економічно недоцільно. Заміна монолітних деталей, біметалевими – актуальна завдання на сьогоднішній день [1-6].

Одним із методів нанесення робочих покриттів є наплавлення. При наплавленні різнорідних матеріалів прагнуть знизити частку основного матеріалу в наплавленому шарі, що дозволяє отримати робочі шари з потрібними властивостями. Маса металу, що наплавляється, при цьому складає 2–6 % маси самої деталі загалом, проте працездатність такої деталі збільшується у рази, що визначає високу економічну ефективність наплавлення [2].

У порівнянні з іншими методами наплавлення плазмове наплавлення має ряд переваг: це високий ККД процесу, простота технічного втілення, можливість 100% автоматизації, мобільність обладнання, широкий діапазон регулювання параметрів режиму наплавлення. Плазмове наплавлення забезпечує мінімальне проплавлення основного металу та дозволяє знизити частку участі основного металу у наплавленому шарі [3]. Враховуючи вище сказане розробка технології модифікації зносостійких покриттів в процесі плазмово-порошкового наплавлення є актуальним на сьогодні.

Мета та завдання дослідження Мета роботи полягала у розробці технології модифікування захисних покриттів у процесі плазмовно-порошкового наплавлення.

Завдання досліджень:

1. Розробити алгоритм технології модифікування захисних покриттів у процесі плазмовно-порошкового наплавлення;
2. Розробити технологій плазмово-порошкового наплавлення наплавочного матеріалу ПС-12НВК-01 та сумішшю ПС-12НВК-01;
3. Провести лабораторні дослідження.

Об'єкт дослідження – процес нанесення захисних покриттів плазмово-порошковим наплавленням.

Предмет дослідження – закономірність впливу режимів плазмово-порошкового наплавлення та складу порошків для нанесення на трибо технічні характеристики нанесеного покриття.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах з урахуванням стандартних і розроблених методик на кафедрі процесів машин і обладнання Поліського національного університету. Аналіз літературних джерел здійснювався аналітико-монографічним методом. Обробку експериментальних даних виконували за допомогою методів математичної статистики з використанням прикладних програм.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Данилюк І.В. Алгоритм розробки технології модифікування захисних покриттів у процесі плазмово-порошкового наплавлення. Збірник тез VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 30-31 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 237-238.

2. Данилюк І.В. Розробка технологій плазмово-порошкового наплавлення наплавочного матеріалу ПС-12НВК-01 та сумішшю ПС-12НВК-01 з нанорозмірним Al_2O_3 . Збірник тез VII-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 31 березня 2021 року. Житомир : ЖАТК. С. 192-194.

3. Грудовий Р.С., Данилюк І.В. Аналіз застосування тугоплавких сплавів при ударно-абразивному зношуванні. Матеріали МНПК «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» Харків : ДБТУ, 2021. С. 113-115.

Практичне значення одержаних результатів. Практичний інтерес для сільськогосподарських підприємств представляє розроблений алгоритм

технології модифікування захисних покриттів у процесі плазмовно-порошкового наплавлення.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 15 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 45 сторінок комп'ютерного тексту, містить 19 рисунків та 5 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АЛГОРИТМ РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЇ МОДИФІКУВАННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ У ПРОЦЕСІ ПЛАЗМОВНО-ПОРОШКОВОГО НАПЛАВАННЯ. ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Було розроблено алгоритм проведення робіт, представлений на рис. 1.1. Запропонований алгоритм визначає послідовність виконання робіт на кожному етапі.

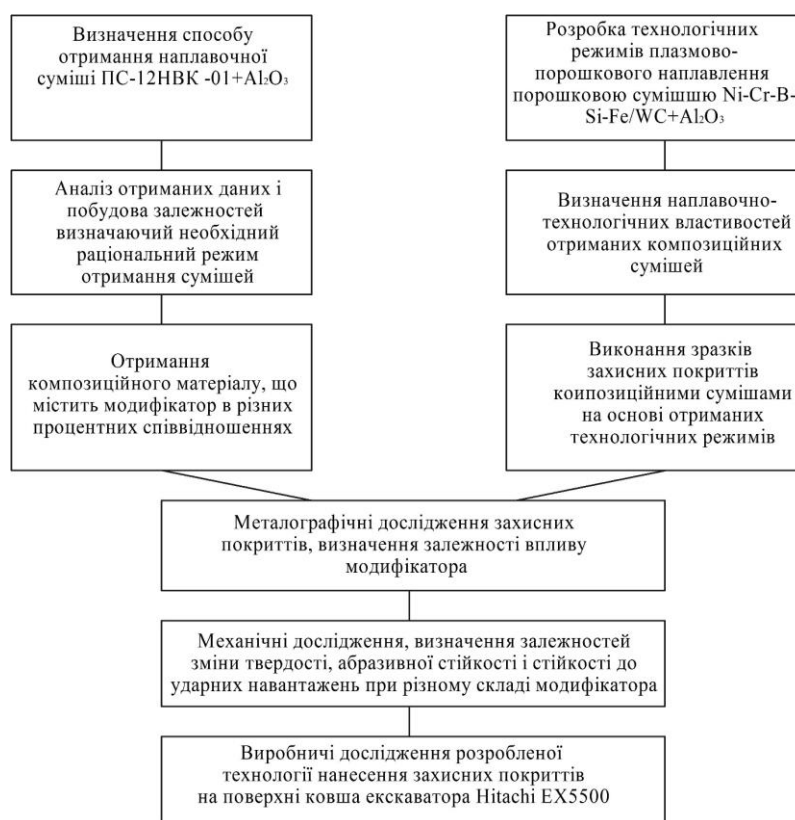


Рис. 1.1. Алгоритм розробки технології модифікування наплавної суміші системи Ni-Cr-B-Si-Fe/WC у процесі плазово-порошкового наплавлення.

Алгоритм складається з трьох частин: перша, технологічна частина - відпрацювання режимів отримання композиційної суміші ПС-12НВК-01 і нанорозмірного Al_2O_3 в процесі механоактивації, відпрацювання технологічних режимів плазово-порошкового наплавлення отриманої композиційної сумішшю та вихідним композиційним матеріалом ПС-12НВК-01. Друга, дослідницька частина – виконання експериментальних робіт на отриманих

зразках наплавок вихідним композиційним матеріалом ПС-12НВК-01 та композиційною сумішшю ПС-12НВК-01 та модифікатора нанорозмірного порошку Al_2O_3 . І третя, виробнича частина полягала у випробуваннях на гірничодобувному обладнанні наплавлених захисних покриттів системи Ni-Cr-B-Si-Fe/WC, отриманих за розробленою технологією модифікування нанорозмірним Al_2O_3 у процесі плазово-порошкового наплавлення.

Нанорозмірні порошкові матеріали схильні до агломерації через високу енергію активації на поверхні частинок, що викликане нерівноважним станом, що призводить до прагнення частинок прийти безпосередньо до рівноважного стану за рахунок збільшення їх загальних розмірів та маси. Висока поверхнева енергія є як перевагою, так і недоліком нанорозмірних частинок. Через нерівноважний стан неможливо отримати суміш стандартними способами перемішування, у процесі яких частинки збираючись в агломерати збільшуються у розмірі та зміцнюється міцність їх зв'язків (Рис. 1.2).

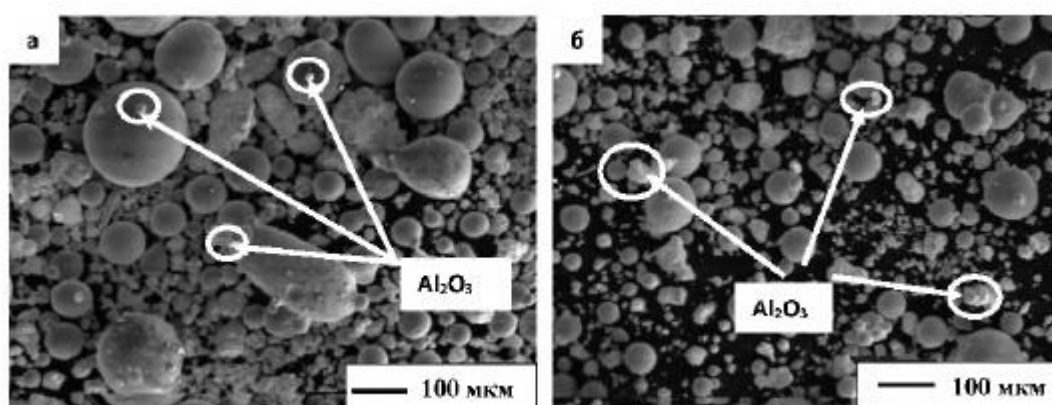


Рис. 1.2. Зміна розмірів агломератів внаслідок перемішування: а – 300 секунд; б - 600 секунд.

Композиційну суміш ПС-12НВК-01 і нанорозмірного порошку Al_2O_3 , отриману при механоперемішуванні в міксері неможливо застосувати при плазово-порошковій наплавці, так як утворюються агломерати, які забиваються в каналах подавального механізму, а досягши плазового струменя порушується її стабільність. Запропоноване первинне вирішення цих проблем полягало у збільшенні розмірів каналів подавального механізму, що дозволило стабільно

подавати порошкову суміш. Крім того, підвищення сили струму плазмового струменя призвело до встановлення стабільності режиму. При збільшенні розмірів каналів подавального механізму і сили струму був присутній і негативний ефект, який полягав у зміні режиму наплавлення, що призвело до збільшення глибини проплавлення, порушення рівномірності подачі присадного матеріалу через широкий спектр розмірів агломератів. Але, що найголовніше, через високий вміст оксиду алюмінію в деяких місцях покриття збільшилася сила поверхневого натягу, що вплинуло на геометрію наплавленого валика отриманої округлої форми перерізу валика, при цьому утворилися дефекти у вигляді пор, підрізів і несплавлення.

Для вирішення існуючої проблеми була застосована механоактивація на планетарному кульовому млині. Представлений спосіб обробки дозволяє важливо знижувати розмірність оброблюваних матеріалів під впливом дроблення кулями, що у циліндрі. Принцип роботи планетарного кульового млина представлений на рис. 1.3.

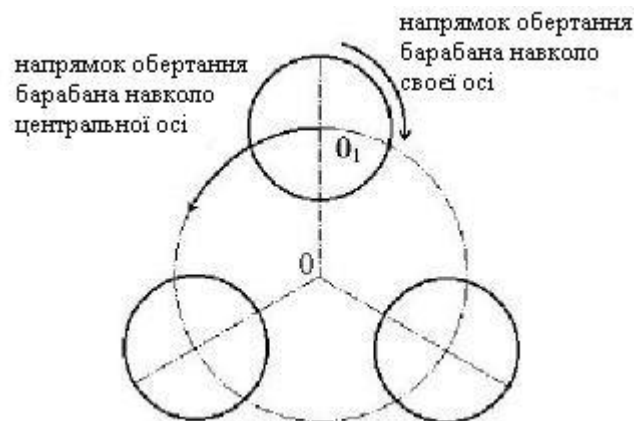


Рис. 1.3. Принцип роботи планетарного кульового млина

Сила впливу в планетарних кульових млинах залежить від розмірів куль, оборотів барабана навколо власної осі (ємності з матеріалом) і оборотів барабана навколо центральної осі. Максимальне гравітаційне прискорення при використанні кульових млинів 30G, а при планетарних кульових млинах досягає 60G, що дозволяє за кілька секунд отримати істотні зміни розмірів частинок оброблюваних матеріалів.

Але при цьому негативним фактором механоактиваційної обробки є можливість протікання хімічних реакцій, а також неможливість подрібнення окремих матеріалів, що входять в суміш. З цієї причини в даній роботі було запропоновано не тільки вивчити ступінь зниження розмірності агломератів нанорозмірного Al_2O_3 , а й провести вивчення характеру зміни основного композиційного матеріалу ПС-12НВК-01, оскільки суттєве зниження розмірів і мас часток призведе до зниження ККД процесу наплавлення через вильот частинок за межі плазмового струменя. Зауважимо, що порошковий матеріал складається з композиції сплаву Ni-Cr-B-Si-Fe і карбіду WC, що мають різні фізичні властивості. З цієї причини визначення зміни розмірів частинок сплаву та карбіду вольфраму проводилося окремо.

Одержання композиційної суміші в процесі механоактивації виконувалося на планетарному кульовому млині АГО-3 (Рис. 1.4), з гравітаційним прискоренням 10G, 20G, 30G.



Рис. 1.4. Планетарний кульовий млин АГО-3.

Очікувалося, що застосування вищих гравітаційних прискорень призведе до суттєвого подрібнення частинок композиційної суміші. Розміри частинок в середньому не перевищуватимуть 15 мкм, що є нетехнологічним розміром при плазмово-порошковому наплавленні і може застосовуватися лише при

газопорошковому напиленні. Час механоактивації не повинен перевищувати 300 секунд, понад якого вимір розмірів частинок також наблизиться до середнього розміру 15-20 мкм, що також неприпустимо. На підставі вищевикладеного було запропоновано режими механоактивації, представлені в таблиці 1.1, що використовуються в подальших експериментальних технологічних дослідженнях процесу наплавлення.

Таблиця 1.1 – Режими механоактиваційної обробки сумішей з модифікатором

№ режі	Гравітаційне прискорення, $G, m/c^2$	Час механоактивації, $t_{акт}, сек.$	Вміст модифікатора у суміші, %
1-30	10, 20, 30	30,60,90,120,150, 180,210,240,270, 300	0,5
31-60			1
61-90			1,5
91-120			2
121-150			2,5
151-180			3

Таким чином, в результаті проведених експериментальних досліджень отримано режими механоактивації для обробки композиційних сумішей з метою зниження присутніх у ній агломератів. Отримані суміші надалі були досліджені і за результатами визначено оптимальний режим механоактивації композиційних сумішей, що містять порошковий нанорозмірний модифікатор Al_2O_3 в діапазоні 0,5-3,0% масової частки.

Для виконання зразків наплавок захисних покриттів системи Ni-Cr-B-Si-Fe/WC з використанням базового наплавного матеріалу ПС-12НВК-01, композиційної суміші ПС-12НВК-01 та нанорозмірного порошку Al_2O_3 застосовувалася серійна установка УПН-303 (рис. 1.5). для плазмово-порошкового наплавлення з плазматроном, що працює на постійному струмі

прямої полярності, та з подачею порошку в стислу дугу прямої дії. Принцип роботи використовуваного плазматрона полягає в тому, що порошок нагрівається і плавиться тепловою енергією плазмового струменя, що далі переноситься на поверхню виробу. Як транспортуючий, плазмоутворювальний і захисний газ використовувався аргон чистий (ГОСТ 10157-79).

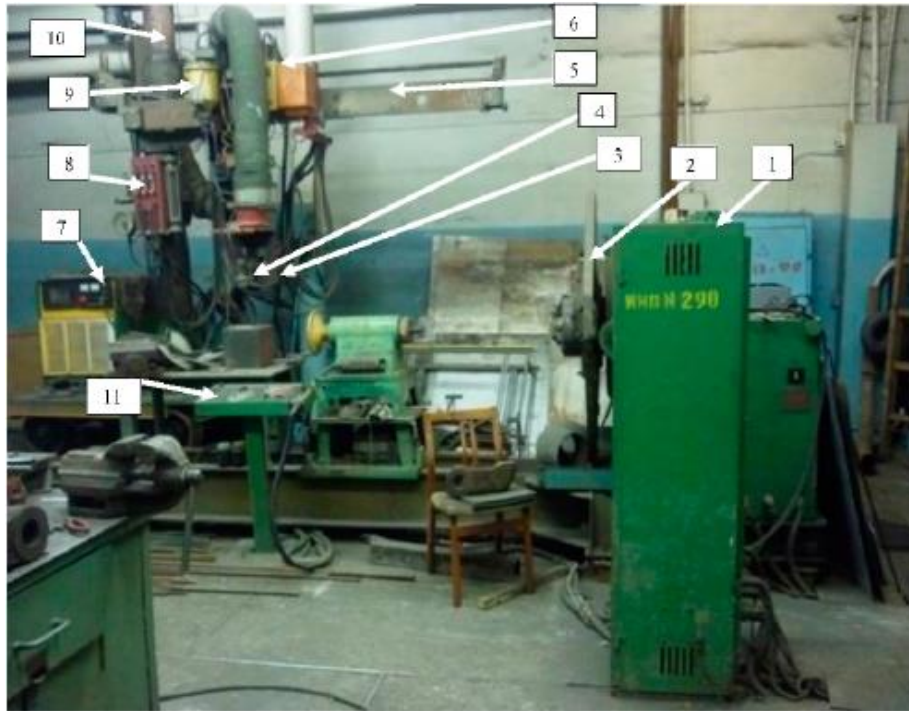


Рис. 1.5. Установка УПН-303: 1 – шафа управління; 2 – маніпулятор; 3 – механізм поперечних коливань; 4 – плазматрон; 5 – напрямна балка; 6 – привід плазматрона; 7 – джерело живлення; 8 – регулятори витрати газів; 9 – порошковий живильник; 10 – підйомно-поворотна колона, 11 – пульт управління.

Зразки наплавки виконували за ескізом, представленим на рисунку 1.6. Так як на початку наплавлення відбувається процес стабілізації плазмового струменя, подача наплавного порошку не проводиться. Це призводить до надмірного оплавлення основного металу, до збільшення частки основного металу наплавленому, перегріву металу в зварювальній ванні, що призводить до утворення крупнозернистої структури. Тому наплавлення виконувалася із застосуванням вхідних та вихідних планок.

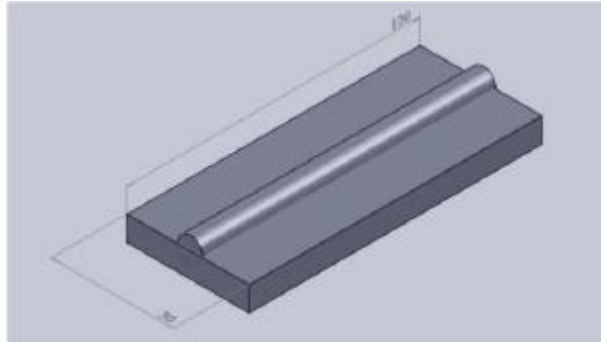


Рис. 1.6. Ескіз зразків наплавов захисних покриттів

Процес наплавлення полягав у виконанні зразків наплавов із вмістом нанорозмірного Al_2O_3 у кількості, представленій у таблиці 1.2. Також для проведення порівняльного аналізу виконувались зразки наплавов вихідним наплавним матеріалом ПС-12НВК-01 та композиційними сумішами ПС-12НВК-01 з різним вмістом нанорозмірного Al_2O_3 .

Таблиця 1.2 – Кількість зразків наплавлення для проведення досліджень

№	Наплавочний матеріал	Кількість зразків для досліджень	
		Металографічні	Механічні
1	ПС-12НВК	6	12
2	ПС-12НВК-01+0,5% Al_2O_3	6	12
3	ПС-12НВК-01+1,0% Al_2O_3	6	12
4	ПС-12НВК-01+1,5% Al_2O_3	6	12
5	ПС-12НВК-01+2,0% Al_2O_3	6	12
6	ПС-12НВК-01+2,5% Al_2O_3	6	12
7	ПС-12НВК-01+3,0% Al_2O_3	6	12

Відсутність літературних даних та практичного досвіду застосування технології плазмово-порошкового наплавлення композиційним матеріалом ПС-12НВК-01 вимагало визначення технологічних параметрів режиму наплавлення.

Розробка технологічних режимів наплавлення виконувалася за відомою методикою. Як відомо, основними технологічними параметрами плазмово-порошкового наплавлення є:

- 1) сила струму (I , А);
- 2) напруга (U , В);
- 3) швидкість переміщення плазматрона (швидкість наплавлення) (v_n , м/год);
- 4) грануляція порошку (d , мкм);
- 5) масова швидкість подачі порошку (G_p , кг/год);
- 6) вид плазмоутворюючого, транспортуючого та захисного газів та їх витрата ($q_{пл}$, $q_{тр}$, q_z , л/хв) відповідно;
- 7) відстань від плазматрону до виробу (h , мм);
- 8) діаметр внутрішнього ($d_{вн}$, мм) та зовнішнього сопел плазматрона (d_n , мм);
- 9) температура підігріву деталі, що наплавляється ($T_{под}$, °С).

У даному випадку пристроєм, що формує термічний цикл у процесі наплавлення, є одноступовий плазматрон з прямою полярністю. Коефіцієнт корисної дії (η) ефективного нагріву плазмовим струменем дорівнює приблизно 0,73, з яких 0,43 витрачається на плавлення основного металу і 0,3 витрачається на плавлення наплавного порошку.

Ефективна теплова потужність плазмового струменя повинна забезпечувати розплавлення порошку і проплавлення основного металу на ширину валика, що наплавляється:

$$q = q_0 + q_p, \quad (1.1)$$

де q_0 – теплова потужність, що йде на проплавлення основного металу;

q_p – теплова потужність на розплав наплавного порошку.

Для розрахунків було прийнято, що процес плавлення основного металу та наплавного порошку відбуваються окремо, з урахуванням ККД використовуваної теплової потужності плазмового струменя.

Далі були виконані самі розрахунки теплової потужності дуги, що витрачається на розплав порошку, яка залежить від його витрати.

Зміна витрати порошку при наплавленні веде до необхідності зміни кількості тепла, що вводиться, так як змінюється витрати енергії, що витрачається на його плавлення. Загалом ефективна теплова потужність, необхідна для розплаву порошку, розраховувалася за такою формулою:

$$Q_{\text{п}} = \frac{G_{\text{пр}} h_{\text{v}}}{\eta_{\text{т}}}, \quad (1.2)$$

де $G_{\text{пр}}$ – швидкість подачі порошку г/с;

h_{v} – питома ентальпія сплаву, що наплавляється Дж/г;

$\eta_{\text{т}}$ – термічний коефіцієнт корисної дії процесу наплавлення.

З урахуванням, що наплавний матеріал є багатокомпонентним, параметри, необхідні для розрахунку питомої ентальпії, розраховувалися за процентним вмістом елементів порошку. Питома ентальпія розраховувалася за такою формулою:

$$h_{\text{v}} \approx c(T_{\text{пл}} + T_{\text{н}}) + \Delta h_{\text{пл}}, \quad (1.3)$$

де c – питома теплоємність, Дж/г; $T_{\text{пл}}$ – температура плавлення порошку наплавлення, °С; $T_{\text{н}}$ – початкова температура порошку наплавлення, °С; $\Delta h_{\text{пл}}$ – прихована теплота плавлення наплавного порошку.

Оскільки принцип подачі порошку в дугу полягає в попаданні його в хвостову частину плазмового струменя, прийнято, що частинки порошку розплавляються до зустрічі з поверхнею основного металу. Тому витрата порошку розраховувалася за формулою:

$$G_{\text{пр}} = Sv\rho\eta_{\text{н}}, \quad (1.4)$$

де S - площа наплавленого шару, мм²; v - швидкість наплавлення, мм/с; ρ - щільність наплавного порошку, г/мм³; $\eta_{\text{н}}$ - коефіцієнт корисної дії наплавлення, що враховує втрати порошку. Площа наплавленого шару задавалася з

урахування необхідних габаритних розмірів валика. Значення було прийнято рівним 0,87.

Нижче наведено розрахунок технологічних параметрів режиму плазмового порошкового наплавлення.

Основним металом є вуглецева Ст3сп. Наплавальним матеріалом є ПС-12НВК-01 системи Ni-Cr-B-Si-Fe/WC. Точних даних про теплофізичні властивості наплавного порошку в літературі виявити не вдалося. Тому при процентному розрахунку прийнято, що:

$C = 1,19$ Дж/г; $T_{пл} = 1563$ °C; $T_{н} = 20$ °C; $\Delta h_{пл} = 360$ Дж/г; $\rho = 0,0767$ г/мм³; $S = 48$ мм²; $v = 5$ мм/с.

Таким чином, при розрахунку теплової потужності, що витрачається на розплав порошку вона склала:

$$G_{пр} = 0,48 \times 5 \times 0,0767 \times 0,87 = 0,1601 \approx 0,160 \text{ г/с}$$

$$h_v \approx 1,19(1569 + 20) + 360 = 2243,77 \text{ Дж/г}$$

$$q_{п} = \frac{0,160 \times 2243,77}{0,3} = 1196 \text{ Вт}$$

Відповідно, погонна енергія, витрачена на плавлення основного металу, становить 1873,4 Вт, ефективна погонна енергія 3069,4 Вт, а повна погонна енергія склала 3986 Вт.

Таким чином, площа проплавлення з урахуванням коефіцієнта корисної дії на плавлення основного металу становить:

$$S_{осн} = \frac{h_{v осн}}{0,43 \times q_0}, \quad (1.5)$$

де $h_{v осн}$ - питома ентальпія основного металу, Дж/г; q_0 – потужність дуги для плавлення основного металу.

При розрахунку площа проплавлення основного металу становить 33 мм². Отже, ступінь проплавлення основного металу становить 32%. З отриманих результатів можна зробити висновок, що при зміні теплового балансу між коефіцієнтами корисної дії спрямованих на плавлення основного металу і

порошку наплавлення, можливе зниження проплавлення основного металу. Проплавлення основного металу може знижуватися до 2%.

Проведений розрахунок показує, що для отримання достовірних значень параметрів режиму наплавлення необхідні експерименти з практичним виконанням зразків плазово-порошкового наплавлення.

З представленого розрахунку видно, що отримані залежності від результатів, отриманих раніше шляхом дослідного наплавлення. Для проведення експериментальних наплавок вибираємо такі параметри режиму, при яких забезпечується необхідна погонна енергія і зміна ступеня проплавлення регулюємо зміною швидкості подачі наплавного порошку збільшення витрат теплової потужності на розплав наплавного порошку. При такому коригуванні досягається мінімальний ступінь проплавлення основного металу і, відповідно, низька частка участі основного металу у наплавленому сплаві.

При розробці технологічних параметрів плазово-порошкового наплавлення також необхідно враховувати і витрата газів, що має дуже значну роль. Так із збільшенням витрати плазмоутворюючого газу частка основного металу в наплавленому збільшується, що суттєво позначається на механічних властивостях наплавленого металу (Рис. 1.7). Роль транспортуючого газу полягає у переміщенні присадного матеріалу у газовому потоці. Так зміна витрати 4 - 9 л/хв впливає на частку основного металу в наплавленому шарі аналогічно плазмоутворюючому, але помітно слабше (Рис. 1.7).

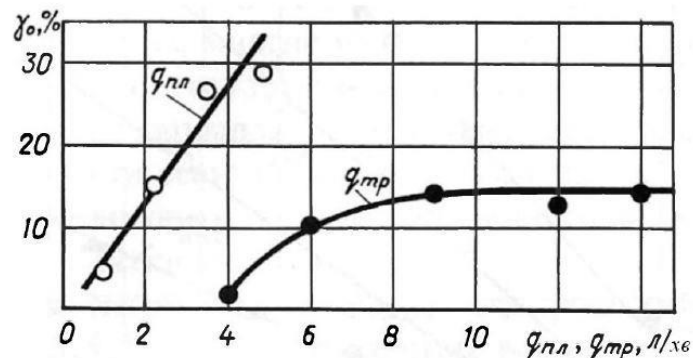


Рис. 1.7. Залежність частки основного металу γ_0 у наплавленому від витрати плазмоутворюючого газу $q_{пл}$ і транспортуючого $q_{тр}$ газів.

Подальше збільшення ніяк не впливає на збільшення частки основного металу, але істотно впливає на ККД процесу наплавлення, знижуючи його через сильний розгін частинок у каналах, що призводить до їх виходу за межі плазмової дуги. Надмірне зниження призводить до недостатньої швидкості і відбувається забивання каналів подачі порошку присадки.

Відстань від плазматрона до виробу має бути в межах 8-15 мм. Це пов'язано з одного боку з підтримкою необхідної мінімальної довжини дуги, з другого - зі зниженням якості захисту зварювальної ванни і збільшенням втрат присадного порошку.

Для проведення експериментальних наплавок змінюються такі параметри режиму, як швидкість подачі порошку наплавлення і швидкість наплавлення. Вибрані параметри режимів відповідають наступним значенням у наведеній нижче таблиці.

Таблиця 1.3 – Режими плазмово-порошкового наплавлення наплавочним матеріалом ПС-12НВК-01

I, А	$q_{пл}$, л/хв	$q_{тр}$, л/хв	$q_з$, л/хв	v_H , м/год	$G_{пн}$, кг/год
180	1,0-2,0	4,0	20,0	10,0	1,0
					1,5
		4,5		8,0	2,0
					2,5
		5,0		6,0	3,0
					3,5

Висновок по розділу

З проведеного аналізу можна зробити висновок, що представлений розрахунок не дозволяє повною мірою отримати робочий режим плазмового порошкового наплавлення. Але при цьому забезпечує можливість визначення необхідної повної погонної енергії для виконання наплавлення і усереднене значення всіх необхідних параметрів для подальшого коригування в умовах дослідного виконання зразків.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НАПЛАВОЧНОГО МАТЕРІАЛУ ПС-12НВК-01 ТА СУМІШШЮ ПС-12НВК-01 З НАНОРОЗМІРНИМ Al_2O_3

При плазово-порошковій наплавці формування геометричних параметрів і механічних властивостей переважно впливає щонайменше на шість параметрів (у разі наплавлення без коливань). Для виконання дослідних зразків наплавок раніше було проведено теоретичний розрахунок. Розрахунок дозволив встановити необхідну погонну енергію, а саме силу струму при заданій напрузі, яка залежить від відстані між соплом плазматрона та зварювальною ванною. Також це дозволило визначити діапазон витрати плазмоутворювального, транспортувального, захисного газів, швидкості переміщення плазматрона, та швидкості подачі наплавного порошку. Отримані параметри представлені у вигляді шести різних режимів, що мають залежність щодо зміни швидкості переміщення плазматрона та швидкості подачі порошку наплавлення (таблиця 2.1).

Відомо, що при напавленні основними параметрами, що впливають на формування напавленого валика, є погонна енергія, швидкість переміщення плазматрона, швидкість подачі порошку наплавлення. При великій погонній енергії більша її частина залишається незатраченою на плавлення напавного порошку, що призводить до її витрат на плавлення основного металу, збільшуючи цим глибину проплавлення основного металу, і знижуючи механічні властивості напавлених зносостійких покриттів. Висока швидкість напавлення знижує глибину проплавлення основного металу. Але при цьому через малі тимчасові проміжки, при яких напавний матеріал знаходиться в розплавленому стані, не відбувається його розтікання за основним металом, що призводить до зниження ширини напавленого валика. Вузкий та високий валик збільшує кількість необхідних проходів (нанесення валиків), що є неприпустимим при

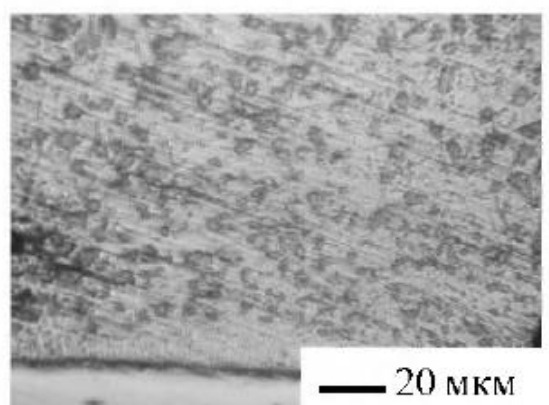
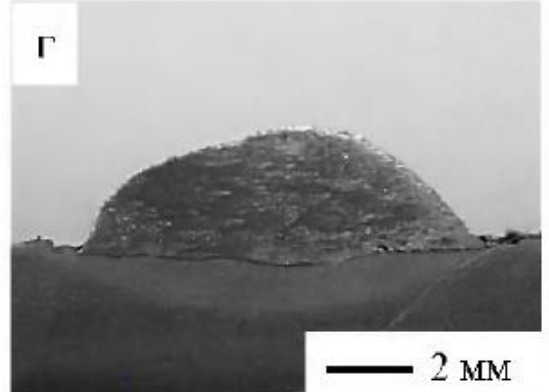
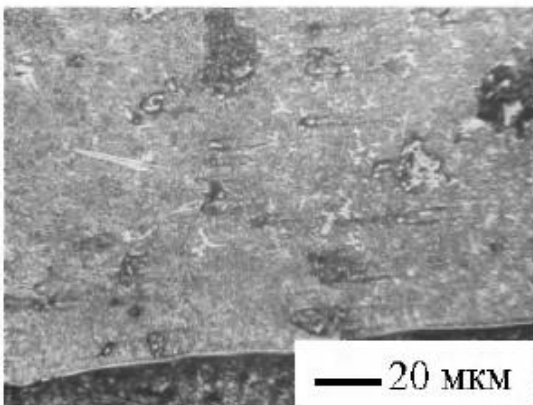
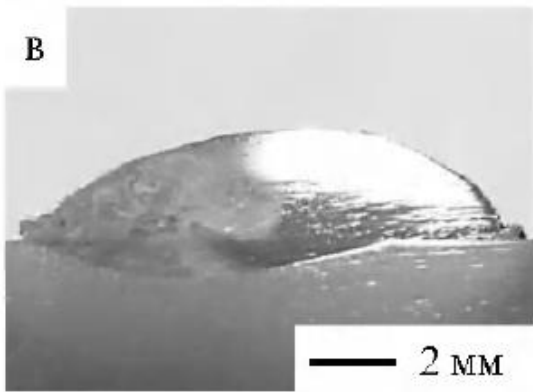
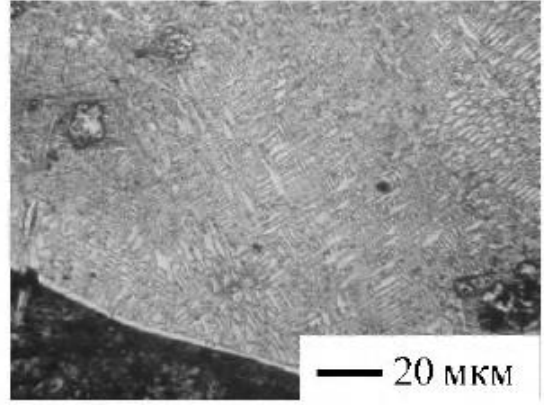
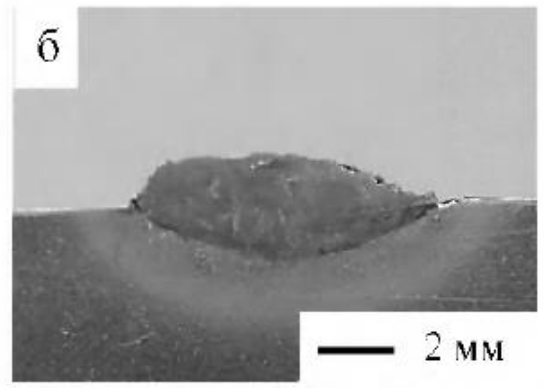
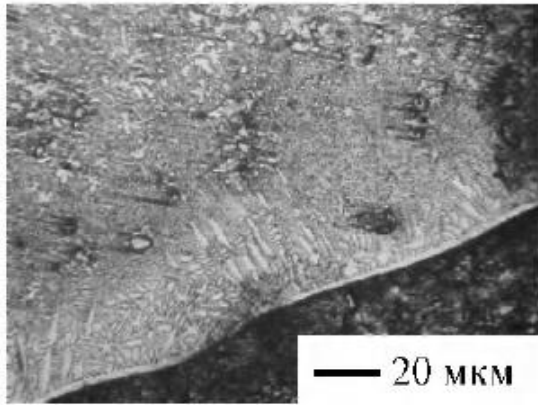
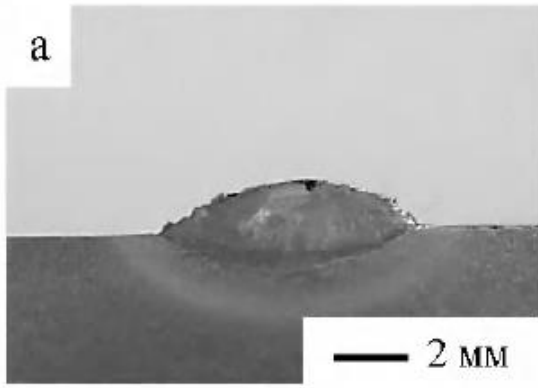
наплавленні деталей гірничодобувного обладнання, які можуть досягати 64 м². Також необхідно врахувати, що при широкошаровому наплавленні кожен наступний валик повинен перекривати попередній на 1/3 його ширини, що також знижує ефективність і збільшує трудомісткість наплавлення. Третім із основних параметрів є швидкість подачі наплавного матеріалу. Вона впливає на глибину проплавлення, знижуючи її зі збільшенням швидкості. А також впливає швидкість наплавлення, при якій надмірне збільшення призведе до відсутності зчеплення з основним металом, а при зменшенні - до звуження валика.

Таким чином, отримані режими дозволили визначити швидкість переміщення плазматрона та швидкість подачі наплавного порошку за постійної погонної енергії.

Таблиця 2.1 – Режими плазово-порошкового наплавлення порошковим композиційним матеріалом ПС-12НВК-01 системи Ni-Cr-B-Si-Fe/WC та композиційною сумішшю ПС-12НВК-01+ Al₂O₃.

№ режиму	I, А	q _{пл} , л/хв	q _{тр} , л/хв	q _з , л/хв	υ _н , м/год	G _{пн} , кг/год
1	180	1,0-2,0	4,0	20,0	21,0	5,0
2						5,5
3			4,5		18,0	6,0
4					6,0	
5			5,0		15,0	6,5
6					7,0	

Спочатку було виконано наплавлення матеріалом ПС-12НВК-01 на режимах, представлених у табл. 2.1. На рис. 2.1 представлені зображення отриманих валиків наплавлення та їх мікроструктур. Зображення "а-е" відповідають режимам 1-6.



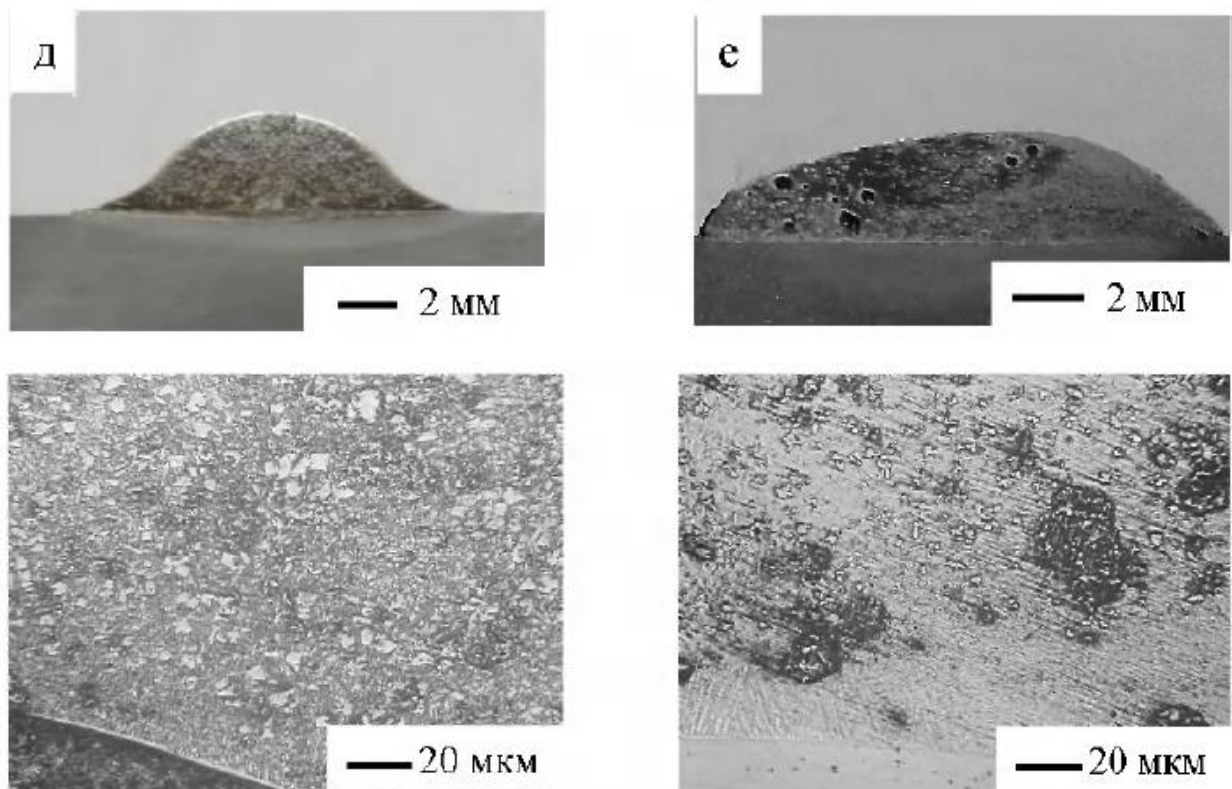


Рис. 2.1. Форми валиків та зона сплаву з основним металом, захисних покриттів, наплавлених композиційним наплавним матеріалом ПС-12НВК-01 за режимами, наведеними в таблиці 2.2: а - № 1; б - №2; в - №3; г - №4; д - №5; е - № 6.

Результати досліджень зразків наплавки, виконаних композиційним матеріалом ПС-12НВК-01 показали наступне. При режимах наплавлення №1-2 (Рис. 2.1, «а-б») присутні дефекти у вигляді несплавлень і підрізів відносно велика зона термічного впливу; глибина проплавлення становить близько половини загальної висоти валика. Таке проплавлення означає високий вміст наплавлення основного металу (вуглецевої сталі), що складається в основі із заліза. Підвищення вмісту заліза в напавленому покритті знижує в'язкість нікелевої основи, зменшуючи цим пластичність основи, що негативно впливає на стійкість до ударних навантажень. Велика глибина проплавлення найімовірніше пов'язана з недостатньою швидкістю подачі наплавного порошку, що викликає надлишок погонної енергії, що витрачається на плавлення основного металу. Валик має ширину близько 4 мм, що викликано високою швидкістю

наплавлення, що не дозволяє розплавленому металу, знаходиться в рідкому стані достатній час для прогріву основного металу і розтікання по його поверхні. Отримані мікроструктури вказують на суттєве розшарування основної та карбідної фази, викликаючи нерівномірний розподіл зносостійкості у міру зношування захисного покриття. Представлені режими є нетехнологічними для застосування наплавлення зносостійких покриттів, а також не підтверджують основи застосування плазово-порошкового способу наплавлення, що забезпечує мінімальне проплавлення основного металу.

Зразок представлений рисунку 2.1 «в» виконаний за режимом №3, також має велику глибину проплавлення, що становить близько 2 мм. При цьому проплавлення основного металу є несиметричним щодо наплавленого валика, що свідчить про розтікання рідкого сплаву поверхнею зразка тільки з одного боку. Такий процес, можливо, викликаний не лише зміною швидкості переміщення плазматрона, а й неперпендикулярністю плазматрону щодо зразка. Ширина валика становить близько 6,0-6,5 мм, що викликане безпосередньо розтіканням валика на поверхні основного металу. Проте щодо мікроструктури виявлено, що карбіди перебувають у досить великих частках, нерівномірно розподілених основі сплаву. Отриманий зразок наплавлення вказує на покращення якості наплавлення порівняно з попередніми зразками. Але отримані результати також дозволяють застосовувати технологічний режим наплавлення №3, застосований виконання зразка «в».

Під час вивчення зразка, представленого на рисунку 2.1. «г», встановлено, що зразок має малу глибину проплавлення, а саме менше ніж 1 мм, ширину валика приблизно 8,0-8,5 мм. Це пояснюється збільшенням швидкості подачі наплавного матеріалу, що у свою чергу збільшує витрати погонної енергії на його розплавлення, зниженням швидкості наплавлення, і збільшенням часу, при якому розплавлений метал встигає прогрівати основний метал і розтікатися по ньому. Подані результати вказують на задовільну якість одержаного валика. Зображення мікроструктури показало, що сплав насичений дрібними карбідними

частинками, що досить рівномірно розподілені в нікелевій матриці. Отриманий зразок демонструє технологічний раціональний режим, при якому наплавлений валик має мінімальну кількість домішок заліза, задовільну ширину, а також рівномірну карбідонасичену структуру.

Зразок, представлений на рисунку 2.1 «д», виконаний на режимі №5, має найбільш симетричну форму з сторонами, що широко розходяться, і ширину порядку 10 мм. Глибина проплавлення основного металу не перевищує 1 мм. Структура наплавленого валика складається з нікелевої основи (матриці) та дрібнодисперсних карбідів WC, що мають кубічну та тетраедричну форми. Карбіди розташовані досить рівномірно за перетином наплавленого валика. Такі показники вказують більш високі показники зносостійкості, ніж у зразках, представлених раніше.

У зразку, представленому на рисунку 2.1 «д» виразно видно, утворення великих частинок карбідів, що знижують зносостійкість покриттів внаслідок викришування з нікелевої матриці. Викришування карбідів викликає оголення пластичної матриці, що не має стійкості до абразивного зношування, що призводить до істотного зниження загальної зносостійкості наплавлених покриттів. Отриманий зразок, виконаний на режимі №6, є нетехнологічним, і не може застосовуватися при наплавленні покриттів, що працюють при ударно-абразивному зносі.

Таким чином, при збільшенні швидкості подачі наплавленого матеріалу і зниженні швидкості переміщення плазматрона був встановлений найбільш раціональний режим №5, при якому наплавлений валик має достатню ширину, має мінімальну глибину проплавлення основного металу, а структура наплавленого сплаву насичена дрібнодисперсними карбідами вольфраму, досить рівно розподілені по перерізу валика.

В результаті проведених експериментальних робіт з виконання зразків плазово-порошковим способом було визначено раціональні технологічні параметри режиму наплавлення, якими є:

- сила струму $I=180$ А;
- витрата плазмоутворюючого газу $q_{пл} = 1,0-2,0$ л/хв;
- витрата транспортуючого газу $q = 5,0$ л/хв;
- витрата захисного газу $q_{зщ} = 20,0$ л / хв;
- швидкість наплавлення $v_n = 6,0$ м / год;
- продуктивність подачі наплавного порошку $G_{пр} = 3,0$ кг/год.

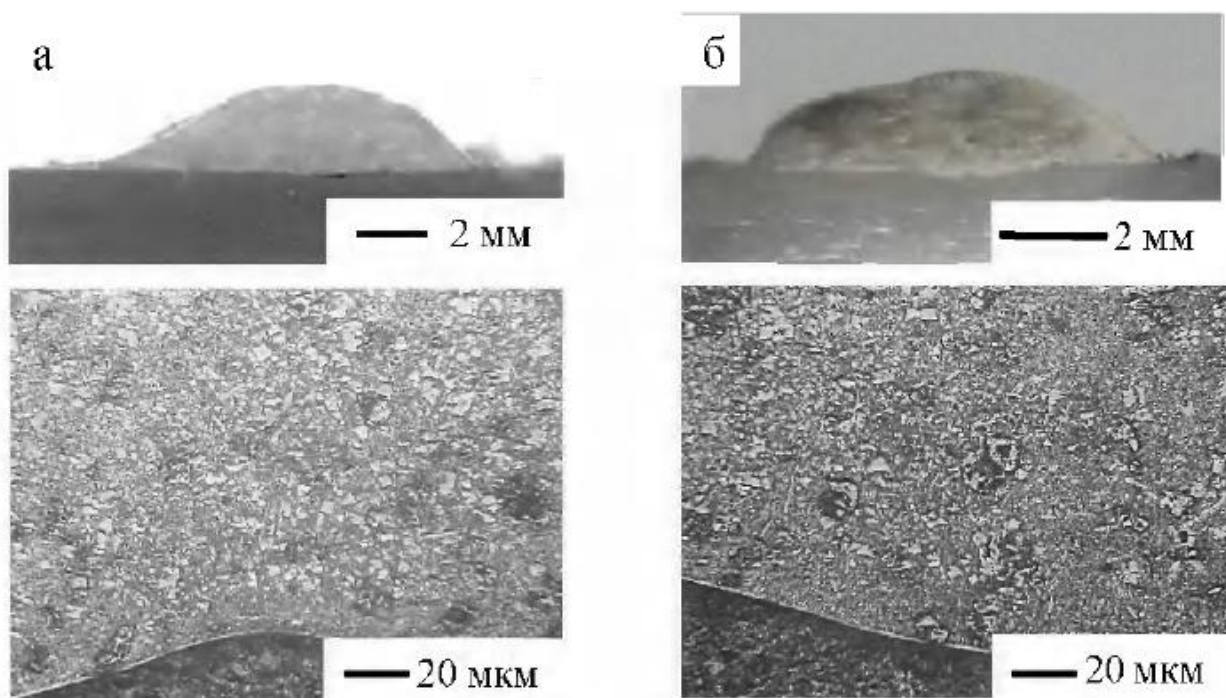
Як відомо, зміна вмісту компонентів у наплавному матеріалі призводить, до необхідності коригування параметрів, що визначають режими наплавлення, в силу зміни погонної енергії, що витрачається, на його розплав. Тим самим змінюється баланс витратної погонної енергії на плавлення наплавного матеріалу та основного металу. Тому було виконано наплавлення композиційною сумішшю ПС-12НВК-01 та нанорозмірного модифікатора Al_2O_3 . За результатами проведеного експерименту, необхідно було визначити характер впливу нанорозмірного модифікатора формування наплавного валика зносостійкого покриття. Для цього були виконані зразки композиційними сумішами ПС-12НВК-01 із вмістом нанорозмірного модифікатора Al_2O_3 0,5-3,0% при технологічному режимі № 5, обраному при наплавленні композиційним матеріалом ПС-12НВК-01. Вивчення формування геометричних параметрів наплавних валиків показало зміну габаритних розмірів валиків при різних вмістах модифікатора в суміші. Зі збільшенням вмісту модифікатора зразки наплавок зменшувалися по ширині валика і збільшувалися по висоті. Так це було помітно на зразках, представлених на рисунку 2.2 «д, е».

Отримані результати вказують на негативний вплив модифікатора при вмісті в суміші більше 2,0 % мас. Таке формування валика може пояснюватися підвищеною поверхневою енергією, що утворюється високою поверхневою енергією нанорозмірних частинок модифікатора, що і призводить до прагнення валиків не розтікатися по основному металу, а намагатися утворити напівсферу. Так встановлено, що введення модифікатора в межах 0,5 - 2,0 % мас., не знижує якості наплавного покриття по відношенню до геометричних розмірів валика,

глибини проплавлення основного металу та технологічності способу плазмово-порошкового наплавлення, що представлено на рисунку 2.2 - г». Зниження ширини валика є нетехнологічним результатом, оскільки призводить до збільшення проходів при напавленні захисних покриттів на деталі машин гірничодобувного обладнання, що володіють великими по площі робочими поверхнями.

Таким чином, запровадження нанорозмірного модифікатора Al_2O_3 більше 1,5% мас. призводить до звуження напавлених валиків, що негативно позначається на технологічному процесі напавлення, збільшуючи число проходів при напавленні великих площин, що викликає перевитрату захисного, транспортувального, плазмоутворюючого газів.

Найбільш раціональним для застосування є плазмово-порошкова напавка композиційною сумішшю ПС-12НВК-01 та нанорозмірного модифікатора Al_2O_3 у кількості 0,5-1,0% мас.



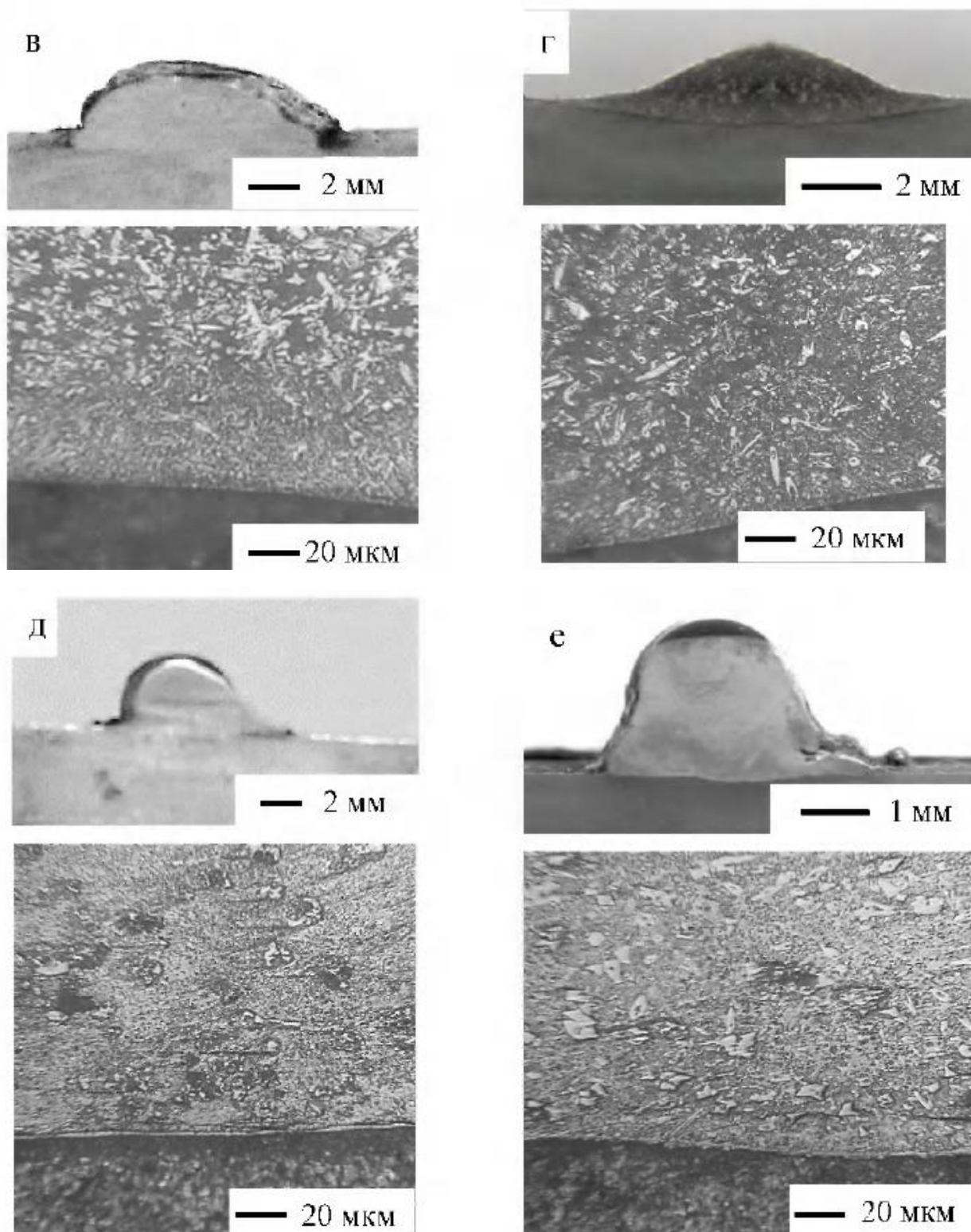


Рис. 2.2. Форми валиків, захисного покриття, виконаного за режимом № 5 композиційною сумішшю, що містить модифікатор нанорозмірний Al_2O_3 : а – 0,5 %; б – 1,0 %; в – 1,5%; г – 2,0 %; д – 2,5%; е – 3,0% мас.

Висновки по розділу

Однак, при розробці технології модифікування захисних покриттів системи Ni-Cr-B-Si-Fe/WC нанорозмірним модифікатором Al_2O_3 необхідно досліджувати всі зразки, виконані композиційними сумішами з різним вмістом нанорозмірного Al_2O_3 , що необхідно для характеру та достовірності залежності зміни зносостійкості покриттів змісту у ньому модифікатора.

Після виконання первинних мікроструктурних досліджень наплавлених покриттів було виконано додаткове розширене дослідження металу наплавок у його перерізах. Це дозволило виявити рівномірність розподілу структурних складових та наявності внутрішніх дефектів, що впливають на якісні характеристики зносостійких покриттів.

РОЗДІЛ 3

МЕТАЛОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАНОРОЗМІРНОГО МОДИФІКАТОРА НА СТРУКТУРУ НАПЛАВЛЕНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

Як відомо, дослідження оптичною мікроскопією дозволяє на мікрорівні вивчити основну будову структури покриття. Так, при дослідженні зразків, виконаних оптичною мікроскопією, отримано більше 100 зображень мікроструктур. Нижче наведено їх аналіз щодо характерних зон у вертикальному перерізі: зон сплавлення, середини (центру покриття) і приповерхневих зон покриттів.

Зразки, наплавлені без модифікатора на відміну зразків, наплавлених з модифікатором, характеризується розвиненою дендритною структурою, викликаною малими швидкостями охолодження, що представлено на рисунку 3.1 (а, б). Дослідження мікроструктури показують, що модифіковані зразки відрізняються зменшенням розмірів та зниженням розгалуженості дендритів. Зменшення розмірів дендритів у найменш зносостійкій, доевтектичній зоні наплавленого покриття є фактором, що надає позитивний вплив на міцність наплавленого металу покриттів у зоні сплавлення. У покриттях, наплавлених без модифікатора, як показано на рисунку 3.1 "в", при порушенні технологічних режимів наплавлення, можуть утворюватися дефекти у вигляді пор.

Слід зазначити, що при дослідженні мікроструктур покриттів, наплавлених без модифікатора, так і з модифікатором, не були виявлені дефекти у вигляді мікротріщин, які, як відомо, схильні утворюватися в захисних покриттях з кількістю карбідів понад 30%. Цей факт можна пояснити лише сприятливим режимом кристалізації наплавленого металу, що забезпечує рівень внутрішньої напруги нижче критичного, що призводить до розтріскування металу.

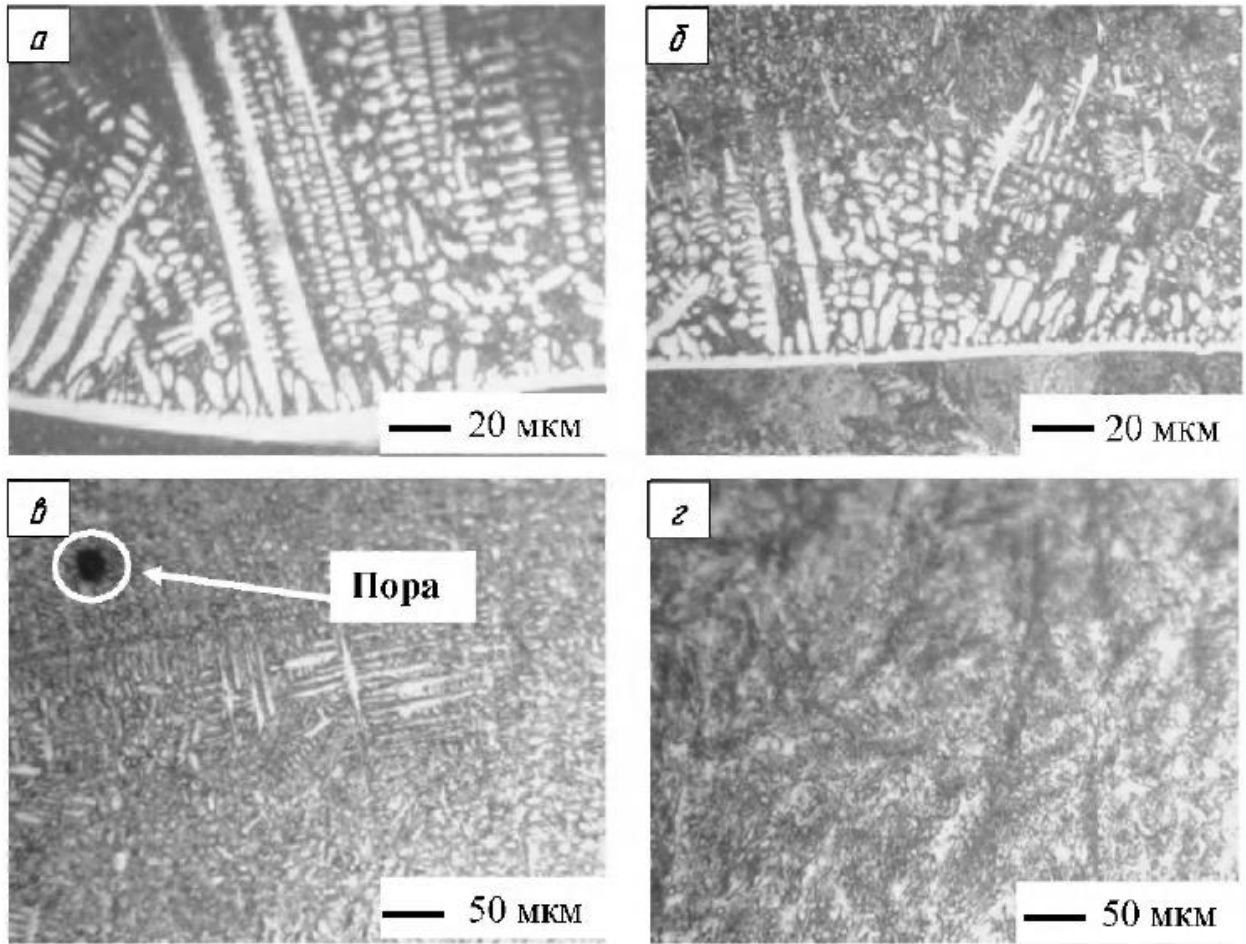


Рис. 3.1. Внутрішні дефекти мікроструктури наплавлених зразків:
а, в – без модифікатора; б, г – з модифікатором.

Характерна також зміна розмірів структурних складових. Воно полягає в тому, що модифіковані структури мають більш дрібну будову та рівномірний розподіл зміцнюючих частинок в основі, ніж немодифіковані, що також свідчить про сприятливий термічний цикл при кристалізації наплавленого металу. Розглянемо їх також за характерними зонами: зоною сплавлення, серединою (центром покриття) і поверхні покриття.

В результаті дослідження встановлено, що розподіл карбідної фази є досить рівномірним, відсутні зони з істотною зміною концентрації карбідів. У зоні сплаву досліджуваних зразків істотних відмінностей по карбідній фазі немає. Ці зони характеризуються рівномірно розподіленою карбідною фазою. При розгляді отриманих зображень на рисунку 3.2 «в, г» видно, що структура середини наплавлення більш однорідна, порівняно із зоною сплавлення.

Слід підкреслити, що загалом структури покриттів, наплавлених без модифікування, представлені іншими дослідниками, ідентичні структурам у цьому дослідженні, що свідчить про повторюваність та достовірність результатів дослідження.

Приповерхнева зона наплавлених покриттів також має розподілену карбідну фазу. Зображення отриманої структури представлені на рисунку 3.2 «а, б».

На наступному етапі досліджень у процесі вивчення мікроструктури було проведено підрахунок бала зерна. При цьому основна та зміцнююча фаза досліджувалися також у зоні сплаву, центрі та на поверхні покриття. Результати розрахунків наведено на рисунку 3.3. Встановлено, що зміна бала зерна відбулася по всьому перерізу зразків. Так підвищення бала зерна у зразках із модифікатором досягає 2 одиниць, що особливо спостерігається у центрі покриття. Однак, при перевищенні вмісту модифікатора понад 2,0% бал зерна модифікованого зразка дорівнює немодифікованому.

Таким чином, дослідження, проведені за допомогою оптичної мікроскопії, однозначно вказують на позитивні (з точки зору кінцевих характеристик ударно-абразивного зношування) структурні зміни у покриттях, наплавлених на раціональних режимах:

- 1) зниження частки дендритної структури у сфері зони сплавлення до повного її зникнення за кількості модифікатора порядку 0,5-1,0%;
- 2) виключення тріщиноутворення;
- 3) підвищення бала зерна зміцнюючої фази у всіх зонах модифікованих покриттів, що має сприятливо позначатися на опорі наплавлених покриттів ударно-абразивного зношування.

Важливо підкреслити, що мікроскопічні дослідження структур у даному розділі виконані для покриттів, наплавлених на тих самих теплових режимах, але з різним вмістом модифікатора Al_2O_3 .

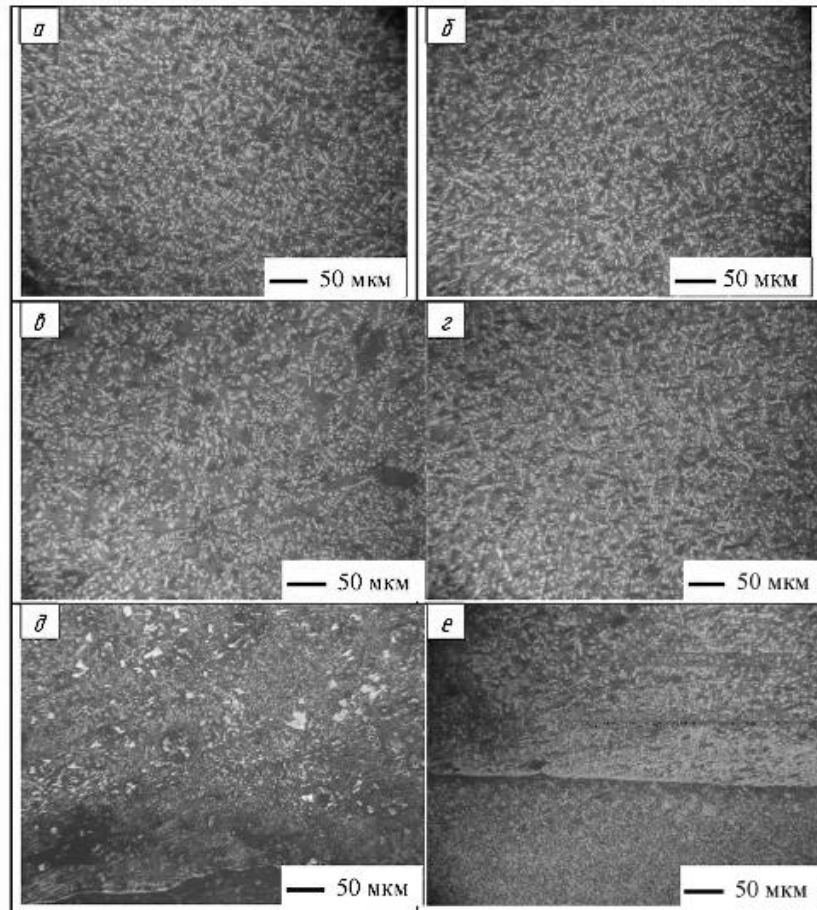


Рис. 3.2. Зображення різних зон наплавлених зразків покриттів: (а, в, д) немодифікованих, (б, г, е) модифікованих

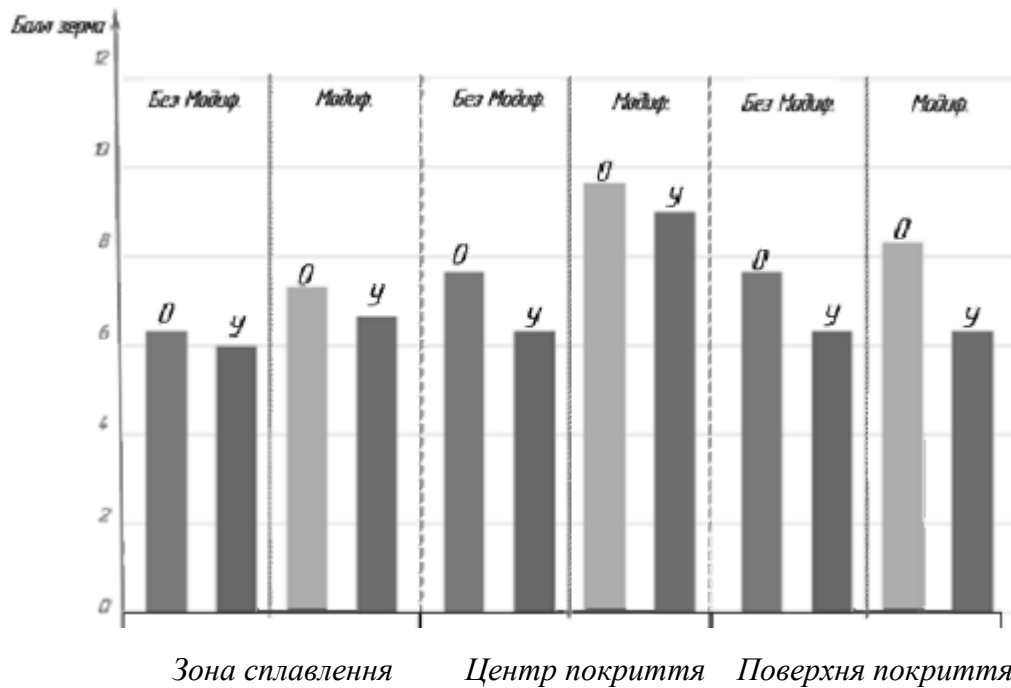
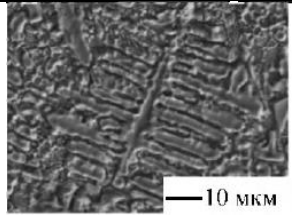
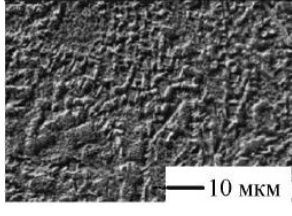
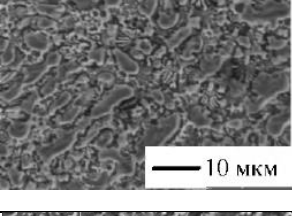
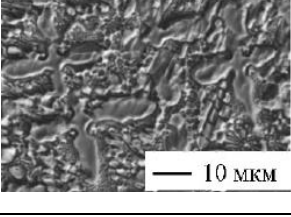


Рис. 3.3. Бали зерна модифікованих покриттів та вихідного складу: 0 – основа покриття, у – зміцнююча фаза.

За результатами визначення фазового складу було виконано методом РСА як на якісному, так і на кількісному рівні. Оскільки покриття є багатофазними (багатокомпонентними), було проведено дослідження, яке показало, що у захисних покриттях присутні 5 фаз. Список виявлених фаз, незалежно від стану зразка та місця дослідження на ньому, наведено у таблиці 3.1. Необхідно відзначити, що в даному розділі представлені результати дослідження фазового складу на якісному та кількісному рівні. Зокрема, поряд із встановленням наявності тих чи інших фаз визначено також розміри та об'ємні частки фаз.

Таблиця 3.1 – Тип фаз та їх об'ємна частка у перерізах досліджуваних захисних покриттів.

Зразок	Фаза	Об'ємна доза фази	Зображення мікроструктур зразків захисних покриттів
Початковий	Fe-Ni	60%	
	Ni-Cr-Fe	5%	
	WC	35%	
Модифікований зразок (0,5% мас. Al ₂ O ₃)	Fe-Ni	65%	
	W ₂ C	5%	
	WC	30%	
Модифікований зразок (1% мас. Al ₂ O ₃)	Fe-Ni	65%	
	W ₂ C	35%	
	Fe ₃ Ni ₃ B	1-2%	
Модифікований зразок (3% мас. Al ₂ O ₃)	Fe-Ni	65%	
	W ₂ C	35%	

Основною фазою для всіх видів зразків є фаза (Fe-Ni), яка представляє собою твердий розчин на основі γ -Ni. Ділянка рентгенограми, що показує

наявність фази (Fe-Ni) у немодифікованому зразку, представлений на рисунку 3.4, і модифікованому зразку - рисунку 3.5. На даній рентгенограмі присутні рефлекси трьох основних фаз Fe-Ni, Ni-Cr-Fe та WC.

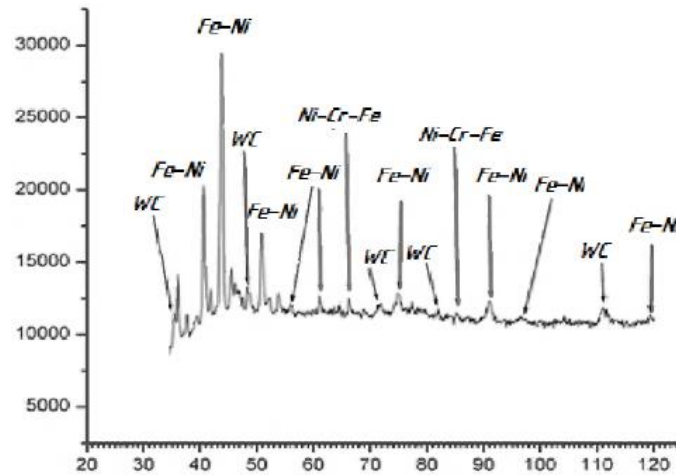


Рис. 3.4. Рентгенограма зразка наплавлення композиційним матеріалом ПС-12НВК-01 (без модифікації).

Слід зазначити, що в досліджуваному сплаві виявлена також фаза (Ni-Cr-Fe), яка являє собою твердий розчин, але на основі α -Fe. Крім того, фаза Fe-Cr-Ni присутня лише у вихідному зразку і, як показали дослідження методом РСА, у міру віддалення від поверхні зразка її об'ємна частка швидко зростає.

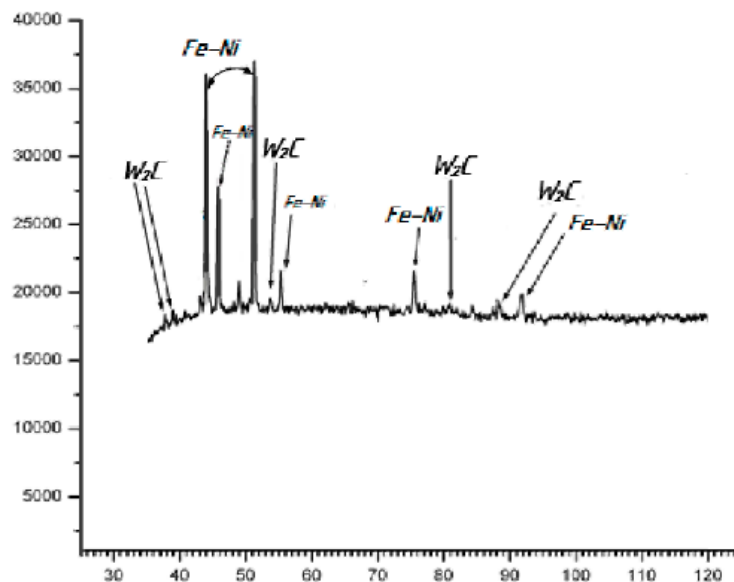


Рис. 3.5. Рентгенограма зразка наплавлення композиційною сумішшю ПС-12НВК-01 з нанорозмірним модифікатором Al₂O₃

Третьою фазою є карбідна фаза WC. В даний час відомі дві форми WC: 1) β -WC кубічна високотемпературна і 2) α -WC гексагональна. В даному випадку – це α -WC. В основному цей карбід присутній у немодифікованому зразку. При цьому важливим є факт, що цей карбід виявляється усіма використаними в роботі методами.

Четвертою фазою є карбід W_2C . Цей карбід присутній у всіх модифікованих зразках і, як показали подальші дослідження, виявляється методами РСА та ПЕМ. Слід зазначити, що карбід W_2C присутній лише у модифікованих зразках.

Аналіз рентгенограм показав, що введення в розплав модифікуючого компонента Al_2O_3 призвело до перетворення карбіду WC на карбід W_2C з такою ж гексагональною кристалічною решіткою.

П'ятою фазою є борид Fe_3Ni_3B , що має орторомбічну кристалічну решітку. Об'ємна частка цієї фази невелика і становить трохи більше 2%. Цей борид надалі був виявлений лише методом ПЕМ модифікованому зразку.

Для підтвердження результатів, отриманих методом РСА, було виконано дослідження модифікованих та немодифікованих зразків методом растрової електронної мікроскопії (РЕМ).

На рис. 3.6 наведено зображення структури наплавленого покриття та частинок WC у немодифікованому зразку. При відносно невеликій роздільній здатності (рис. 3.6 а) добре виявляється дендритна структура з чітко позначеним стовбуром та розвиненими вторинними гілками, що підтверджує результати дослідження наплавок методом оптичної мікроскопії. При цьому виявити карбіди при такому дозволі практично не вдається, хоча відповідно до теорії кристалізації частинки карбідів повинні розташовуватися в міждендритному просторі. Для підтвердження цієї тези був виконаний аналіз тих же ділянок наплавленого металу при значно більшій роздільній здатності. В результаті аналізу при більшій роздільній здатності частинки WC були виявлені, і було

встановлено, що вони мають глобулярну форму з середнім розміром близько ~ 4 мкм.

Аналогічні дослідження модифікованих наплавлених покриттів показали, що вплив модифікатора на структурні зміни виявляється у наступному (Рис. 3.7). По-перше, практично повністю зникла дендритна структура, що сама собою є фактором, що позитивно впливає на показники зносостійкості наплавлених покриттів. По-друге, введення модифікатора Al_2O_3 у кількості 1% призвело до помітного подрібнення структурних складових, у тому числі і карбідної фази. Розмір частинок WC зменшився до 2 мкм та менше. Це також є позитивним фактором, що впливає на показники зносостійкості.

Тим не менш, незважаючи на хорошу збіжність фактичних даних, отриманих з використанням світлової, растрової мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу, було виконано додаткове дослідження методом просвічуваної електронної мікроскопії (ПЕМ), яке ставило своїм завданням отримати додаткові підтвердуючі факти існування в наплавлених покриттях карбідної фази W_2C .

На рис. 3.8 подано типові зображення тонкої структури модифікованого покриття.

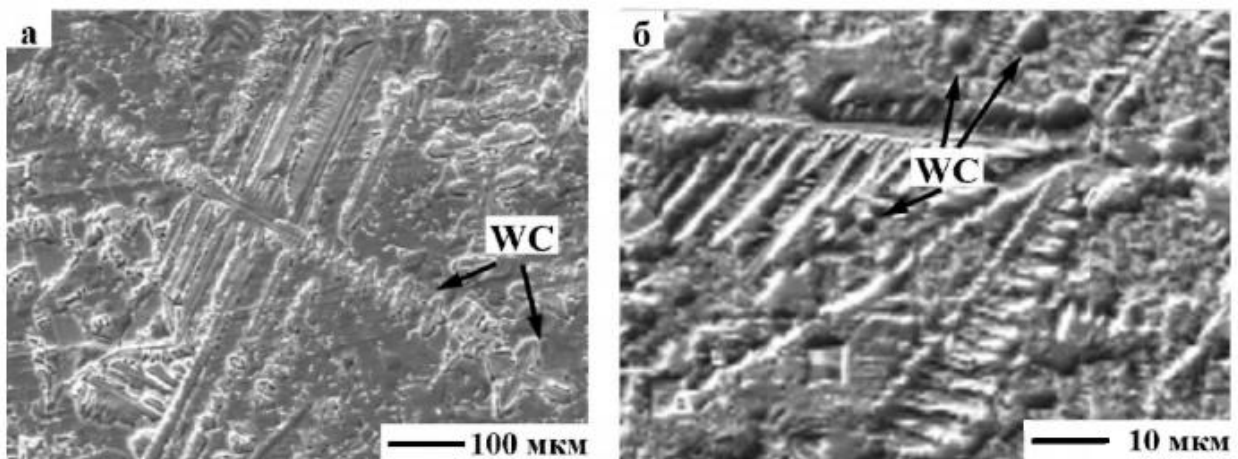


Рис. 3.6. Типові зображення тонкої структури немодифікованих зразків, отримані методом РЕМ.

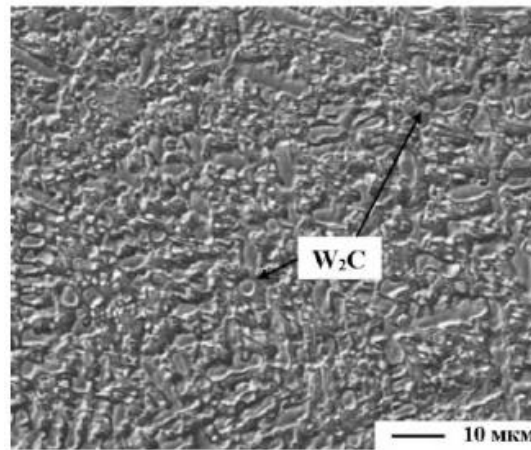


Рис. 3.7. Зображення тонкої структури, отримані методом РЕМ, зразка захисного покриття, модифікованого нанорозмірним Al_2O_3

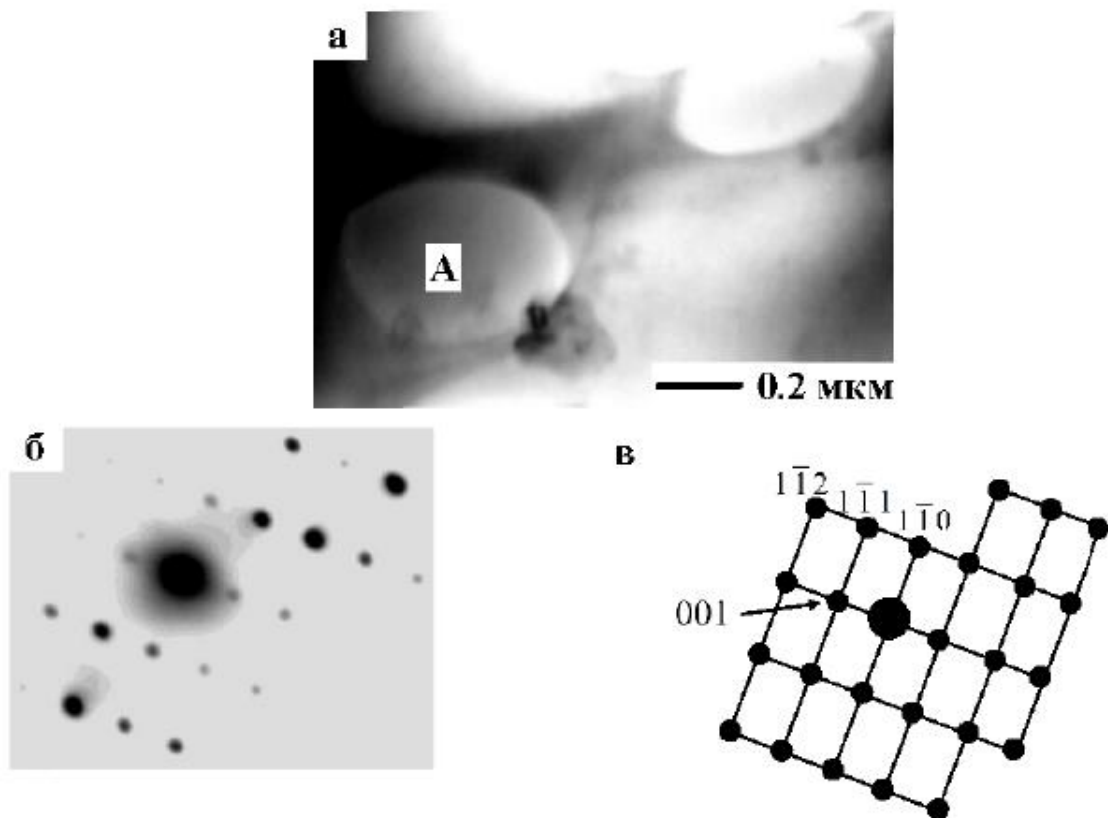


Рис. 3.8. Карбіди W_2C у сплаві ПС-12НВК-01, модифікованому нанорозмірним Al_2O_3 : а – світлопольне зображення; б – мікродифракційна картина, отримана з частки А; г – її індикована схема (присутні рефлекси, що належать площині (110) карбіду W_2C).

Цей карбід має округлу форму, середній розмір становить величину $\sim 0,5$ мкм. Об'ємна частка карбиду W_2C у досліджених перерізах становить в середньому 35%.

Дослідження, проведені методом ПЕМ, показали, що частина фаз, що спостерігаються, має чітко виражений дефектний характер. Розглянемо дефектну структуру з прикладу центральної частини (перетин 2) модифікованого зразка. Розгляд проведемо послідовно 1) у ГЦК фазі, 2) у ГПУ фазі та 3) у вторинних фазах, а саме, у карбіді W_2C та бориді Fe_3Ni_3B .

Твердий розчин (Fe-Ni) з ГЦК кристалічними ґратками займає обсяг $\sim 90\%$ від загального обсягу матеріалу. Область когерентного розсіювання $D > 100$ нм і, з міркувань, наближається до величини 300 нм. Це відповідає внутрішнім напруженням $\sigma = 400$ МПа. Скалярна густина дислокацій $\rho \sim 5 \cdot 10^{10}$ см⁻². Ця величина визначалася двома способами. Перший метод – метод РСА:

$$\rho = \frac{3\sqrt{2\pi}(\varepsilon^2)^{1/2}}{Db}, \quad (3.1)$$

де $(\varepsilon^2)^{1/2}$ – спотворення кристалічних ґраток, D – область когерентного розсіювання, b - вектор Бюргерса. Другий метод визначення величини ρ – метод ПЕМ. Був використаний метод січень:

$$\rho = \frac{M}{t} \left(\frac{n_1}{l_1} + \frac{n_2}{l_2} \right), \quad (3.2)$$

де M – збільшення мікрофотографії, n_1 і n_2 - число перетинів дислокаціями горизонтальних l_1 і вертикальних ліній l_2 , відповідно (l_1 і l_2 - сумарна довжина горизонтальних і вертикальних ліній), t – товщина фольги. При визначенні величини ρ метод РСА дав дещо більше значення, метод ПЕМ – менше. Видно, що дефектна структура розподілена нерівномірно: зустрічаються місця із високою скалярною щільністю дислокацій.

Близькою за властивостями ГЦК фази є ГПУ фаза (Fe-Ni). У цій фазі величина області когерентного розсіювання $D > 100$ нм (як і ГЦК фазі), але внутрішні напруження нижче ($\sigma = 120$ МПа). Скалярна густина дислокацій також нижче ($1.5 \cdot 10^{10}$ см⁻²). Цікаво відзначити, що співвідношення між внутрішніми

напруженнями та величинами скалярних щільностей дислокацій у ГЦК та ГПУ фазах збігаються:

$$\frac{\sigma_{\text{ГЦК}}}{\sigma_{\text{ГПУ}}} = 3,3; \frac{\rho_{\text{ГЦК}}}{\rho_{\text{ГПУ}}} = 3,3. \quad (3.3)$$

Визначення напруження у фазі W_2C методом РСА вказує на високі поля напружень ($\sigma = 800$ МПа). Дислокаційна структура – сітчаста. Скалярна густина дислокацій за даними ПЕМ: $\rho = 0,3 \cdot 10^{10}$ см⁻².

Поряд з карбідом W_2C іншою вторинною фазою в матеріалі є борид Fe_3Ni_3B . Його електронно-мікроскопічне зображення наведено на рисунку 3.9. Як показали дослідження, частки Fe_3Ni_3B навколо себе не створюють значних напружень. Це означає слабку закріпленість в основі, що характерно для боридів, що утворюються в покриттях Ni-Cr-B-Si-Fe/WC.

Якщо порівняти дефектну структуру і внутрішні напруження на поверхні зразка (перетин 1), то можна сказати, що всі кількісні параметри дефектної структури в кожній фазі в цьому перерізі практично збігаються з відповідними параметрами структури перерізу 2 тільки величина внутрішніх напружень в ГЦК твердому розчині (Fe -Ni) дещо вище ($\sigma = 440$ МПа). Тим не менш, необхідно звернути увагу на те, що об'ємні частки фаз різні. Тому загалом за зразком кількісні параметри структури відрізнятимуться.

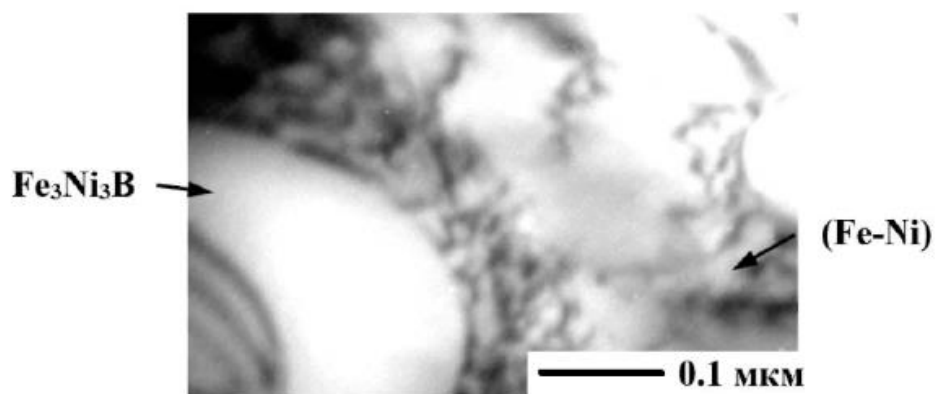


Рис. 3.9 Дислокаційна структура у різних фазах наплавлених покриттів при приготуванні яких було введено нанорозмірний модифікатор Al_2O_3 - стик двох фаз (Fe-Ni) та Fe_3Ni_3B . Метод ПЕМ.

Аналіз гістограм зміни внутрішніх напружень показав, що у зразках, наплавлених без модифікатора величина напружень дещо більше, ніж у модифікованого покриття (Рис. 3.10, а). А в покриттях з модифікатором Al_2O_3 величина внутрішнього напруження зменшується. Але ці зміни незначні (не більше 10%), що не може істотно позначитися на міцності самого покриття та його показниках опору ударним впливам.

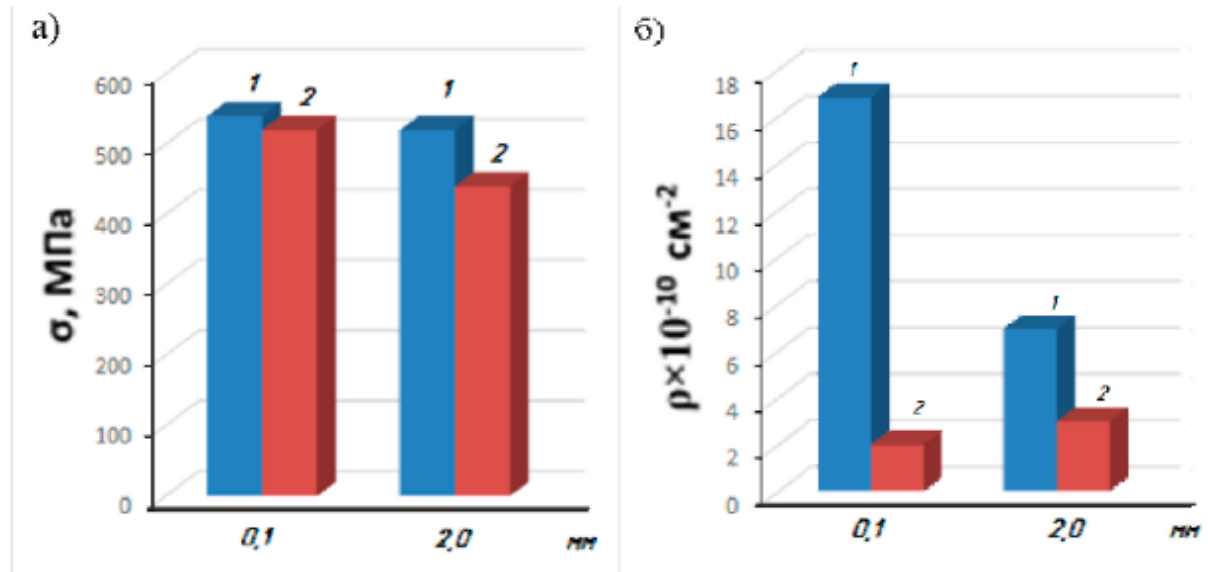


Рис. 3.10. Зміна внутрішніх напружень σ (а) та скалярної щільності дислокацій ρ (б) у міру віддалення від поверхні зразка до підкладки: 1 – зразок, наплавлений без модифікатора; 2 – зразок, наплавлений з модифікатором

Аналіз скалярної щільності дислокацій немодифікованого покриття показав, що ця величина зменшується від зони сплавлення до поверхні наплавлення більш ніж у два рази, що свідчить про нерівномірність розподілу напружень по перерізу покриття, а, отже, нерівномірності властивостей покриттів (рис. 3.10, б).

Порівняльний аналіз скалярної щільності модифікованого покриття показав збільшення цієї величини на 50%, що можна розглядати як позитивний фактор впливу збільшення опору покриттів механічному зношуванню.

Висновки по розділу.

Таким чином, комплексні дослідження структури немодифікованих і модифікованих покриттів методами світлової, електронної растрової, просвічуваної електронної мікроскопії, визначення бала зерна, рентгеноструктурного аналізу, визначення внутрішніх напружень і скалярної щільності дислокацій в покриттях показали практично однозначно позитивний вплив введення нанорозмірних Al_2O_3 моди покриття. Це також підтверджує достовірність отриманих наукових результатів та висновків щодо вибору раціональних технологічних параметрів плазмово-порошкового наплавлення.

ВИСНОВКИ

Таким чином, комплексні дослідження структури немодифікованих і модифікованих покриттів методами світлової, електронної растрової, просвічуваної електронної мікроскопії, визначення бала зерна, рентгеноструктурного аналізу, визначення внутрішніх напружень і скалярної щільності дислокацій в покриттях показали практично однозначно позитивний вплив введення нанорозмірного Al_2O_3 модифікатора на структурні зміни в захисних покриттях.

При наплавленні композиційними матеріалами, що містять модифікатор, забезпечується формування карбідонасиченої структури, що має приблизно вдвічі більші показники мікротвердості.

Необхідно особливо відзначити, що при випробуваннях на ударну в'язкість та абразивну стійкість вміст модифікатора близько 1% зумовив найбільші показники стійкості.

Таким чином, дослідження мікроструктури та механічних властивостей захисних покриттів підтверджують, що раціональним змістом підвищення стійкості композиційних покриттів системи Ni-Cr-B-Si-Fe/WC є 1,0% мас. у композиційному матеріалі ПС-12НВК-01, що необхідно для забезпечення кращих показників при експлуатації гірничодобувного обладнання із захисними покриттями в умовах ударно-абразивного зношування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Каплуна В.Г. Зносостійкість деталей екструдерів і термопластавтоматів в абразивному середовищі Хмельницький : ХНУ. 2014. 234 с.
2. Гладкий П.В., Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменная наплавка. Київ : «Екотехнологія», 2007. 345 с.
3. Лебедев Б.Д. Терминология процессов сварки с использованием присадочного материала. *Сварочное производство*. 1980. С. 43-52.
4. Хасуй А. Техника напильника. Москва :Машиностроение, 1975. 329 с.
5. Гладкий П.В. Плазменная наплавка роликов проводковой арматуры стана 600. *Автоматическая сварка*. 1989. С. 84-92.
6. Гладкий П.В., Переpletчиков Е.Ф., Сом А.И. Порошки для плазменной наплавки. Москва : Техника. 2017. 450 с.
7. Чкалов Л.А. Плазменная наплавка сплавов на основе меди. *Автоматическая сварка*. 1981. С. 45-51.
8. Новожилов Н.М. Основы металлургии дуговой сварки в активных защитных газах. Москва : Машиностроение. 1992. 214 с.
9. Петров Г.Л. Сварочные материалы. Москва : Машиностроение, 2020. 457 с..
10. Чвертко А.И. Основы рационального проектирования оборудования для автоматической и механизированной электрической сварки и наплавки. – Киев: Наукова думка, 1988.
11. Усов Л.Н., Борисенко А.И. Применение плазмы для получения высокотемпературных покрытий. Москва : Наука, 2015. 237 с.
12. Переpletчиков Е.Ф., Гладкий П.В. О влиянии параметров плазменнопорошковой наплавки на проплавление основного металла. Високопроизводительные процессы наплавки и наплавочные материалы. Коммунарск, 1973. С. 46-53.

13. Сом А.И. Новые плазматроны для плазменно-порошковой наплавки *Автоматическая сварка*. 2020. №2. 234-146.

14. Мовчан Б.А., Кушниренко Б.Н. Сварка аустенитной стали с независимой присадочной проволоки *Автоматическая сварка*. 1980. С. 24-43.

15. Овсиенко Л.Е. Влияние нерастворимых примесей на кристаллизацию и структуру металлов. *Кристаллизация металлов*. Москва : Изд-во АН СССР. 1960. 678 с.