

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

БОБРОВ МАКСИМ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.793.7

**ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ТА ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ
ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНОЮ ДІЄЮ НА ГЕТЕРОФАЗНИЙ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ СТРУМІНЬ**

Спеціальність 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Дубовий Олександр Миколайович,
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, завідувач кафедри матеріалознавства і технології металів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кузнецов Валерій Дмитрович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, завідувач кафедри інженерії поверхні;

кандидат технічних наук, доцент
Сєліверстов Ігор Анатолійович,
Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, кафедра основи конструювання.

Захист відбудеться «18» січня 2016 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 при Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України за адресою: НУК, проспект Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України за адресою: НУК, проспект Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна.

Автореферат розіслано « ____ » грудня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Л.І. Коростильов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення надійності техніки, забезпечення конкурентоспроможності, а також подовження ресурсу роботи та її реновація є актуальною проблемою сучасного виробництва. Одним з найбільш пріоритетних і кардинальних шляхів вирішення цих проблем є нанесення на поверхню деталей і конструкцій захисних покриттів. Серед різних методів їх отримання однією з найбільш розповсюджених є група газотермічного напилення (ГТН), що включає найбільш поширені електродуговий та плазмовий методи.

Електродугове напилення характеризується простотою та технологічністю, високими енергетичним ККД розпилення і коефіцієнтом використання матеріалу, низькою вартістю та найвищою продуктивністю. Плазмовий метод дозволяє отримувати покриття з широкого спектру матеріалів без обмеження за їх температурою плавлення, характеризується ефективним управлінням процесом формування покриттів.

Але поряд з цим є властиві обох методам недоліки: високий рівень пористості (від 6 до 12 %), низька міцність зчеплення з основою (до 30 МПа для електродугових покриттів і до 50 МПа для плазмових), а міцнісні властивості являються найважливішими характеристиками покриття.

Великий вклад у розвиток газотермічних методів напилення щодо підвищення фізико-механічних властивостей покриттів та ефективності їх формування внесли такі вчені як: В.В. Кудінов, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, С.В. Петров, Ю.С. Коробов та інші.

Аналіз ефективності сучасних способів підвищення фізико-механічних властивостей газотермічних покриттів показує, що основний результат їх застосування полягає переважно у забезпеченні високих енергетичних параметрів напилюваних частинок та зменшенні їх розмірів. Перспективними є способи, у яких використовується імпульсний вплив на процес напилення, зокрема механічний, акустичний, електричний, лазерний, гідравлічний та ін. Серед них слід відмітити використання електроімпульсного впливу, який характеризується низьким енергоспоживанням та невисокою вартістю додаткового обладнання.

Таким чином, вказані недоліки у поєднанні з високою технологічністю та універсальністю згаданих методів ГТН, а також результати аналізу перспективних способів підвищення фізико-механічних властивостей напилених покриттів, спонукають до їх розвитку, тому тема дисертаційної роботи «Підвищення фізико-механічних властивостей електродугових та плазмових покриттів електроімпульсною дією на гетерофазний високотемпературний струмінь представляється актуальною для машинобудівної, суднобудівної та інших галузей промисловості України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Основні етапи дисертаційної роботи виконані у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи «Наукові основи формування наноструктурних елементів у пластично деформованих металах та прогнозування фізико-механічних

властивостей наноструктурних металокомпозитів» № 0112U000352 Міністерства освіти і науки України і держбюджетної науково-дослідної роботи «Наукові основи підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей напилених покриттів із металів і сплавів формуванням наноструктурних елементів термічною обробкою та електроімпульсною дією» № 0115U000299 Міністерства освіти і науки України. Рівень участі у роботах – виконавець.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи полягає у розробці технологічних основ та практичних рекомендацій щодо підвищення фізико-механічних властивостей електродугових та плазмових покриттів шляхом електроімпульсної дії на гетерофазний високотемпературний струмінь та подальшої їх термічної обробки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- теоретично обґрунтувати та експериментально підтвердити можливість підвищення фізико-механічних властивостей електродугових та плазмових покриттів електроімпульсною дією на гетерофазний високотемпературний струмінь за рахунок здрібнення та прискорення частинок дисперсної фази;
- визначити оптимальні амплітудно-частотні параметри електроімпульсної дії при електродуговому та плазмовому напиленні і встановити їх вплив на гранулометричний склад, температуро-швидкісні характеристики напилюваних частинок, мікроструктуру отриманих покриттів;
- дослідити фізико-механічні та експлуатаційні властивості покриттів, напилених з використанням електроімпульсної дії;
- встановити вплив електроімпульсної дії на температуро-часові параметри наступної передрекристалізаційної термічної обробки напилених покриттів та показати перспективи її застосування;
- розробити технологічні рекомендації щодо процесу нанесення електродугових та плазмових покриттів з використанням електроімпульсної дії та їх термічної обробки.

Об'єкт дослідження – процеси формування електродугових та плазмових покриттів при електроімпульсній дії на гетерофазний високотемпературний струмінь, їх фізико-механічні та експлуатаційні властивості.

Предмет дослідження – закономірності впливу електроімпульсної дії на гетерофазний високотемпературний струмінь при електродуговому та плазмовому напиленні на мікроструктуру, фізико-механічні та експлуатаційні властивості напилених покриттів.

Методи дослідження. Теоретичною та методологічною базою досліджень являються роботи вітчизняних та зарубіжних вчених в області створення газотермічних покриттів з підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями.

Дослідження якості отриманих електродугових та плазмових покриттів здійснювали за допомогою мікроструктурного аналізу на оптичному металографічному мікроскопі ММУ-3 та визначення твердості за Віккерсом. Дослідження теплопровідності покриттів проводили за допомогою вимірювача ИТ-λ-400. Міцність зчеплення покриттів з основою визначали методом

«витягування штифта» на розривній машині УММ-5 на зразках-свідках. Зносостійкість отриманих покриттів досліджували на машині тертя СМЦ-2 за схемою «ролик-колодка» в умовах обмеженого змащування. Визначення областей когерентного розсіювання рентгенівського випромінювання (ОКР) для оцінки розмірів субструктури матеріалу покриття здійснювали методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН-3.

Наукова новизна роботи полягає у тому, що:

1. Удосконалено процес електродугового та плазмового напилення щодо підвищення фізико-механічних властивостей покриттів шляхом електроімпульсної дії на високотемпературний гетерофазний струмінь за рахунок здрібнення та прискорення частинок дисперсної фази.

2. Вперше встановлено закономірності впливу електроімпульсної дії на мікроструктуру (знижується пористість та зменшується висота ламелей) та твердість (підвищується на 20-35%) електродугових і плазмових покриттів. Визначено її оптимальні амплітудно-частотні параметри для електродугового напилення дроту із Св-08Г2С (частота імпульсів – 6,5 кГц, амплітуда – 5 кВ) та плазмового напилення порошку ПГ-19М-01 (частота – 5 кГц, амплітуда – 5 кВ), що забезпечують максимальний рівень фізико-механічних властивостей отриманих покриттів.

3. Вперше показано, що використання електроімпульсної дії на оптимальних амплітудно-частотних параметрах при електродуговому напиленні дроту із Св-08Г2С забезпечує підвищення: середньої підлітної швидкості частинок на 20%, міцності зчеплення покриття з основою на 30 %, твердості на 35 %, зносостійкості в 1,7 рази та зменшення пористості з 6 % до 3 %. Використання електроімпульсної дії на оптимальних амплітудно-частотних параметрах при плазмовому напиленні порошку ПГ-19М-01 забезпечує підвищення: середньої підлітної швидкості частинок на 25 %, міцності зчеплення покриття на 18 %, твердості на 20 %, зносостійкості в 1,5 рази та зменшення пористості з 8 % до 5 %.

4. Вперше встановлено вплив електроімпульсної дії при електродуговому та плазмовому напиленні на температуро-часові параметри наступної передрекristалізаційної термічної обробки (знижується температура та час витримки) напилених покриттів. Визначено її оптимальні режими для електродугового покриття з дроту Св-08Г2С (400 °С, 1 хв) та плазмового з порошку ПГ-19М-01 (250 °С, 2 хв), які забезпечують підвищення твердості у середньому на 15 % у порівнянні з аналогічно термообробленими покриттями, нанесеними за традиційною технологією, за рахунок збільшення швидкості частинок та здрібнення субзерен до наномасштабних розмірів включно.

5. Набув подальшого розвитку процес передрекristалізаційної термічної обробки напилених покриттів щодо підвищення тривалості витримки (до 20 хв) за рахунок наступної пластичної деформації покриття (15 %), яка забезпечує зниження рухливості малокутових полігонізаційних субмеж.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Обґрунтованість наукових результатів підтверджується ретельним аналізом наукових робіт у даній області, задовільним узгодженням

результатів вирішених завдань із результатами робіт інших авторів, необхідною точністю експериментів і застосуванням методів математичної статистики для обробки отриманих результатів.

Наукова значимість роботи полягає у виявленні закономірностей формування електродугових та плазмових покриттів при накладанні високовольтних електричних імпульсів на гетерофазний високотемпературний струмінь, визначенні впливу оптимальних амплітудно-частотних параметрів електроімпульсної дії на температуро-швидкісні характеристики дисперсної фази у струмені, мікроструктуру і фізико-механічні та експлуатаційні властивості отриманих покриттів. Визначенні оптимальних режимів передрекristалізаційної термічної обробки напилених покриттів для забезпечення максимального рівня їх властивостей.

Практичне значення отриманих результатів. На основі комплексу теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних у дисертаційній роботі, розроблено та доведено до практичного використання технологічні основи електродугового і плазмового напилення покриттів з електроімпульсною дією на гетерофазний високотемпературний струмінь зі здрібненою та більш щільною структурою з комплексом підвищених фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Застосування результатів досліджень, які отримані у роботі, а саме визначення схеми підключення джерела високовольтних імпульсів, оптимальних параметрів електроімпульсної дії при електродуговому та плазмовому напиленні покриттів та подальшої їх термічної обробки надають можливість розширити номенклатуру більш дешевих напилюваних матеріалів для нанесення покриттів з підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями на важконавантажені деталі суднового і сільськогосподарського машинобудування, електротехнічних виробів, деталей військово-промислового комплексу.

Впровадження результатів дисертації. Основні результати роботи впроваджені на підприємствах: ТОВ «Зерноторгівельна компанія «Прометей», ООО «АГРО ВОЛЯ», ФГ «Покровські ворота» щодо відновлення посадочних місць під підшипники і вузлів гідравлічного обладнання, а саме нанесення покриттів на робочі поверхні поршнів гідроциліндрів.

Результати досліджень впроваджені у навчальний процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є закінченим комплексним дослідженням. Усі теоретичні і практичні результати, отримані у ході її виконання, одержані претендентом особисто.

У роботах, написаних у співавторстві, претендентові належить: [9, 15, 22] – визначення швидкості частинок при плазмовому напиленні покриттів; [6, 14, 18, 20, 23] – проведення досліджень, спрямованих на визначення впливу величини деформації частинок при напиленні на тривалість витримки при передрекristалізаційній термічній обробці напилених покриттів, визначення твердості; [1-5, 11-13, 16, 17, 19, 21, 24, 25] – визначення оптимальних амплітудно-частотних параметрів електроімпульсної дії при електродуговому

та плазмовому напиленні, дослідження мікроструктури, визначення зносостійкості, міцності зчеплення з основою та теплопровідності отриманих покриттів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи були оприлюднені в якості доповідей та обговорені на наступних конференціях:

– Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції “Інновації в суднобудуванні та океанотехніці”. – Миколаїв: НУК, 2012.

– Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих науковців “Зварювання та споріднені процеси і технології” – Миколаїв: НУК, 2012.

– Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції “Інновації в суднобудуванні та океанотехніці”. – Миколаїв: НУК, 2013.

– Матеріали VII Международной научно-технической конференции “Сварка и родственные технологии”. – Киев, 2013.

– Матеріали 12-ой Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия». – Москва, 2013.

– Матеріали VII международной научно-технической конференции “Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее”. – Киев, 2013.

– Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції, присвяченої 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова, та III Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих науковців «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології» – Миколаїв: НУК, 2014.

– Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції “Інновації в суднобудуванні та океанотехніці”. – Миколаїв: НУК, 2014.

– Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Миколаїв: НУК, 2015.

Публікації. За темою дисертації надруковано двадцять п’ять наукових робіт, з котрих 8 статей, із яких 7 у виданнях, що входять до Переліку ДАК України, 15 тез доповідей, отримано 2 патенти України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, переліку використаної літератури, що налічує 166 позицій та додатків. Робота викладена на 172 сторінках машинописного тексту, вміщує 10 таблиць та 52 ілюстрації.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності роботи, формулювання мети й завдань досліджень, наукових результатів і їх практичного значення, дані про зв’язок роботи з науковими темами. Висвітлено особистий внесок здобувача і наведено відомості про апробацію результатів роботи та кількість публікацій.

У першому розділі за результатами аналізу опублікованих у наукових виданнях робіт досліджено сучасний стан проблеми щодо формування

електродугових та плазмових покриттів з підвищеними фізико-механічними і експлуатаційними властивостями.

Огляд науково-технічної літератури та інших джерел інформації показав, що для вирішення цієї задачі застосовують як технологічні так і конструкторські прийоми. Кожен з них направлений на вирішення конкретної проблеми: застосування додаткових відновних газів – для зменшення окиснення напилюваного матеріалу; модифікація сопел – підвищення швидкості частинок та збільшення коефіцієнту використання матеріалу за рахунок звуження кута розкриття потоку. Тенденції розвитку плазмового напилення пов'язані, в основному, з підвищенням енергетичних характеристик напилюваного матеріалу. Також у останні роки набувають поширення методи, які полягають у подрібненні мікроструктури, формуванні у матеріалі покриття наноструктурних елементів. Перспективними являються способи підвищення фізико-механічних властивостей електродугових та плазмових покриттів, що пов'язані з накладанням різноманітних імпульсних впливів на процес напилення, зокрема механічних, електричних, акустичних, гідравлічних тощо. Серед них слід відмітити використання електроімпульсного впливу, який характеризується низьким енергоспоживанням та невисокою вартістю додаткових конструктивних елементів і обладнання. На цій підставі обґрунтовано мету і сформульовано завдання дослідження.

У другому розділі наведені матеріали, обладнання та методики досліджень. Одним з найважливіших критеріїв вибору матеріалів, що використовувались у даній роботі – це їх розповсюдженість та низька вартість.

Дослідження проводились на зразках, виготовлених з конструкційної вуглецевої якісної сталі 45. Вказана сталь призначена для виготовлення втулок, колінчатих та розподільних валів, шпинделів, циліндрів, штоків та ін.

Для отримання покриттів обрані наступні матеріали: зварювальний дріт марки Св-08Г2С ГОСТ 2246-70; дріт із легованої сталі 12Х18Н10Т ГОСТ 18143-72 (діаметр дротів складав 1,2 мм); порошок марки ПГ-19М-01 ТУУ 322-19-001-95 фракцією 40...80 мкм.

Напилення електродугових покриттів проводили на установці КДМ-2, у комплект якої входить електродуговий апарат ЕМ-14М з центральною сопловою системою подачі стисненого повітря та джерело живлення «Тимез-500», призначене для живлення електричної дуги металізаційного апарату постійним струмом.

Плазмові покриття отримували за допомогою установки «Київ-7», яка укомплектована плазмотроном ПУН-1. Як плазмотвірний та транспортуючий газу використовували стиснене повітря.

Визначення частоти та амплітуди електричних імпульсів проводили за допомогою осцилографа універсального С1-99. Градування дільника для визначення амплітуди імпульсів виконували на генераторі сигналів ГЗ-7А. Запис осцилограм при електродуговому та плазмовому напиленні здійснювали цифровим двоканальним USB-осцилографом фірми «IRIS». Вимірювання електричного опору гетерофазних високотемпературних струменів при

плазмовому та електродуговому напиленні здійснювали за допомогою мегаомметра Ф4102/1М.

Просушування порошку перед напиленням виконували у сушильній шафі з регулюванням температури до 350°C типу СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-ИИМ.

Ситову класифікацію порошку проводили на віброситі СО-130У2, використовуючи сітку номерів 004 і 008 по ГОСТ 6613-86.

Для підготовки поверхні зразків використовували установку струменево-абразивної обробки марки 026-7 «Ремдеталь».

Знімки мікроструктур отримували за допомогою цифрової камери Delta Optical HDCE-20С, що укомплектована програмним забезпеченням для обробки зображень Score Image 9.0, на оптичному металографічному мікроскопі ММУ - 3. Розмірна лінійка на знімках встановлювалася за допомогою об'єкт мікрометра ГОСТ 7513-55, який знімався на тому ж збільшенні, що й відповідна мікроструктура.

Визначення ОКР рентгенівського випромінювання для оцінювання розмірів субструктури покриттів здійснювали методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН-3.

Твердість по Віккерсу HV_5 визначали при навантаженні на індентор 5 кг (ДСТУ ISO 6507-4:2008), пористість покриттів вимірювали за отриманими мікроструктурами за допомогою планіметричного методу. Міцність зчеплення покриттів з основою – методом витягування штифта на розривній машині УММ-5. Визначення зносостійкості проводили на машині тертя СМЦ-2, зважування зразків – на лабораторний вагах моделі ТВЕ-0.21.

Деформацію покриттів виконували на пресі П50 з навантаженням до 20 т.

Термообробку роликів, колодок з покриттями здійснювали в лабораторній електричній печі СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1.

Знімки високотемпературних гетерофазних струменів при електродуговому та плазмовому напиленні отримували за допомогою фотокамери Nikon D300.

У третьому розділі встановлено, що при використанні зовнішнього змінного електричного поля у рідких напилюваних частинках виникають електричні сили, що направлені протилежно силам поверхневого натягу. Виконано розрахунки даних сил на прикладі електродугового та плазмового напилення та показано, що їх значення перевищує значення сил поверхневого натягу. Аналіз літературних джерел показав, що інтенсифікувати процеси здрибнення напилюваних частинок при електродуговому напиленні можна за рахунок використання змінного зовнішнього електричного поля, частота якого має відповідати частоті власних коливань рідких крапель металу. За допомогою аналізу осцилограм зриву крапель металу та розрахунків визначено середній діаметр частинок, що утворюються при розпиленні дротів-електродів на початковій ділянці струменя, він склав 228 мкм. Розрахована власна частота коливань цих рідких частинок при електродуговому напилюванні, що складає 6,5 кГц.

Встановлено, що при плазмовому напиленні частота зовнішнього змінного електричного поля для інтенсифікації процесів здрибнення частинок дисперсної

фази має відповідати частоті пульсацій плазмового струменя, оскільки частота власних коливань напилюваних часток знаходиться в ультразвуковому діапазоні, а ультразвукові хвилі характеризуються інтенсивним затуханням у газовому середовищі. За рахунок аналізу осцилограми роботи плазмотрону на робочому режимі, визначено частоту пульсацій плазмового струменя за рахунок великомасштабного та дрібномасштабного шунтування непрямої дуги, яка складає близько 5 кГц.

У результаті розрахунку встановлено, що з використанням зовнішнього електричного поля дисперсні частинки при електродуговому та плазмовому напиленні набувають додаткової кінетичної енергії, що призводить до підвищення їх підлітної швидкості в середньому на 10 % та 33 % відповідно.

На підставі проведеного аналізу ймовірнісних процесів та розрахунків електричних сил, власних частот коливань дисперсних частинок і самого плазмового струменя теоретично обґрунтована можливість підвищення фізико-механічних властивостей електродугових та плазмових покриттів електроімпульсною дією на високотемпературний гетерофазний струмінь за рахунок здрібнення частинок та їх прискорення у зовнішньому змінному електричному полі.

У четвертому розділі розроблено технологічні основи напилення електродугових та плазмових покриттів з електроімпульсною дією на гетерофазний високотемпературний струмінь.

Проводили повний факторний експеримент. На основі експериментальних та літературних даних як незалежні змінні (фактори) обрали: частоту електричних імпульсів – X_1 та амплітуду – X_2 . Оптимальні технологічні параметри напилення встановили попередньо за допомогою металографічного аналізу отриманих покриттів та вимірювання твердості. Електродугове напилення проводили на режимі: напруга на дузі – 25 В, сила струму – 110 А, тиск стисненого повітря – 0,6 МПа, дистанція напилення – 100 мм. Плазмові покриття наносили на наступному режимі: напруга на дузі – 180 В, сила струму – 150 А, дистанція напилення – 180 мм, витрати плазмотвірного газу – 6,5 м³/год, тиск транспортуючого газу – 0,01 МПа. Як плазмотвірний та транспортуючий гази використовували стиснене повітря. Попередні експерименти та розрахунки показали, що використання частот до 4 кГц і напруг до 5 кВ істотно не впливає на міцнісні властивості покриттів і пористість, а застосування високих амплітудно-частотних параметрів призводить до проблем з ізоляцією, тому для планування експерименту обрали їх відповідні діапазони: частота електричних імпульсів від 4 до 8 кГц, напруга – від 5 до 10 кВ.

У результаті планування експерименту визначені адекватні лінійні моделі залежності твердості покриттів від амплітудно-частотних параметрів електроімпульсної дії. Для електродугового напилення дротом Св-08Г2С рівняння регресії має вигляд $Y=2352+171X_1+45X_2-65X_1X_2$, для плазмового напилення порошку марки ПГ-19М-01 – $Y=1342-62X_1+24X_2-16X_1X_2$. Функція відгуку – твердість покриттів по Віккерсу.

За допомогою отриманих регресійних рівнянь за методом крутого сходження у роботі визначені оптимальні амплітудно-частотні параметри електроімпульсної дії при електродуговому напиленні із дроту Св-08Г2С та плазмовому напиленні порошку марки ПГ-19М-01, які забезпечують підвищення твердості електродугового та плазмового покриттів на 35 % та 24 % відповідно. Для електродугового покриття режим полягає у використанні високовольтних електричних імпульсів частотою 6,5 кГц та напругою 5 кВ; для плазмового – частотою 5 кГц, напругою 5 кВ.

У результаті побудови та аналізу гістограм розподілу часток за фракціями за допомогою металографічного методу по пробам, зібраним при напиленні у воду (рис. 1), встановлено, що середній розмір частинок при електродуговому напиленні згаданих матеріалів при використанні електроімпульсної дії на оптимальному режимі зменшується з 84 мкм до 54 мкм, при плазмовому – з 50 мкм до 42 мкм.

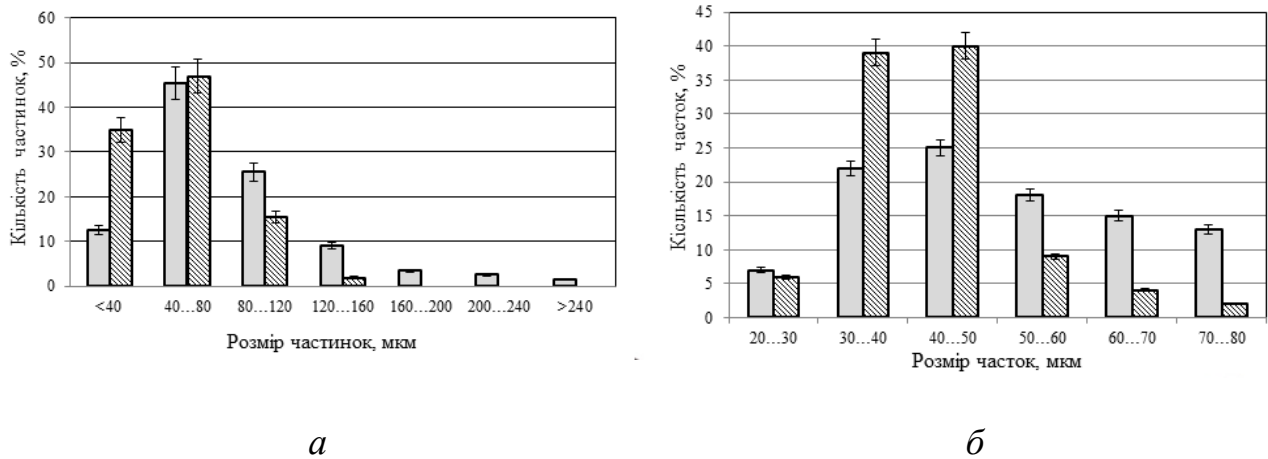


Рисунок 1 – Гранулометричний склад напилюваних частинок при електродуговому (а) та плазмовому (б) напиленні: □ – за традиційною технологією; ▨ – з використанням електроімпульсної дії

Середню підлітну швидкість частинок у високотемпературному гетерофазному струмені досліджували методом швидкісної цифрової фотозйомки, методика якої полягає у визначенні довжин треків частинок при відповідній експозиції зйомки та статистичній обробці отриманих даних (рис. 2). Для перевірки адекватності експериментальних даних розраховували швидкість частинок по радіальному перерізу на дистанції 100 мм на основі попередньо проведених розрахунків осьової швидкості. У результаті встановлено, що внаслідок використання електроімпульсної дії при електродуговому напиленні дроту Св-08Г2С та плазмовому напиленні порошку марки ПГ -19М-01 спостерігається підвищення даної характеристики на 20 % та 25 % відповідно при забезпеченні похибки відносно розрахованих значень близько 5 %.

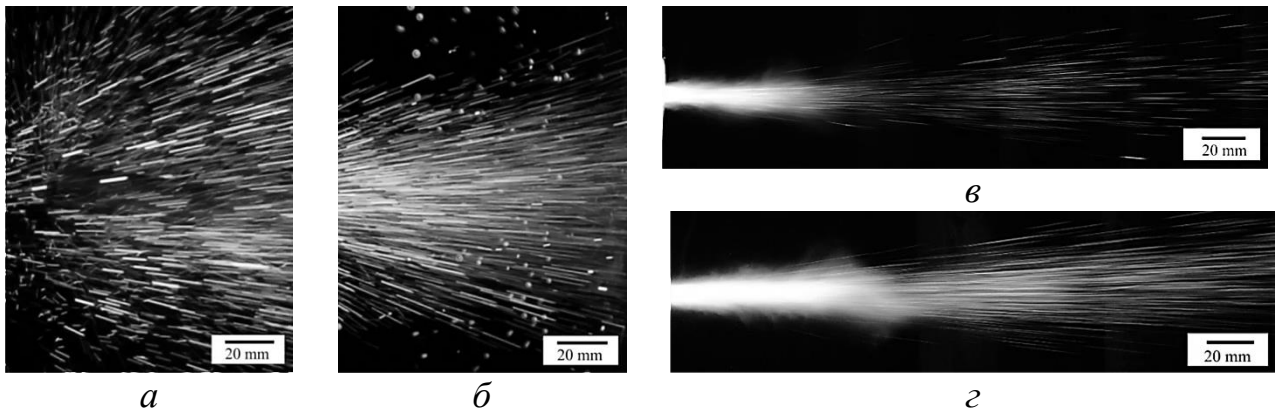


Рисунок 2 – Треки струменя при електродуговому напилюванні дроту Св-08Г2С (експозиція $0,25 \cdot 10^{-3}$ с) (а,б) та плазмовому напиленні порошку ПГ-19М-01 (експозиція $0,5 \cdot 10^{-3}$ с) (в,г):
а, в – за традиційною технологією;
б, г – з використанням електроімпульсної дії

Згідно з отриманими мікроструктурами покриттів (рис. 3) електроімпульсна дія на оптимальних амплітудно-частотних параметрах забезпечує зменшення пористості електродугового покриття з дроту Св-08Г2С з 6 % до 3 %, плазмового з порошку ПГ-19М-01 – з 8 % до 5 %. Також збільшується величина деформації напилюваних частинок (зменшується висота ламелей) з 83 % до 87 % для електродугових та з 80 % до 83 % для плазмових покриттів (похибка вимірювань складає близько 1,5 %) за рахунок підвищення їх швидкості.

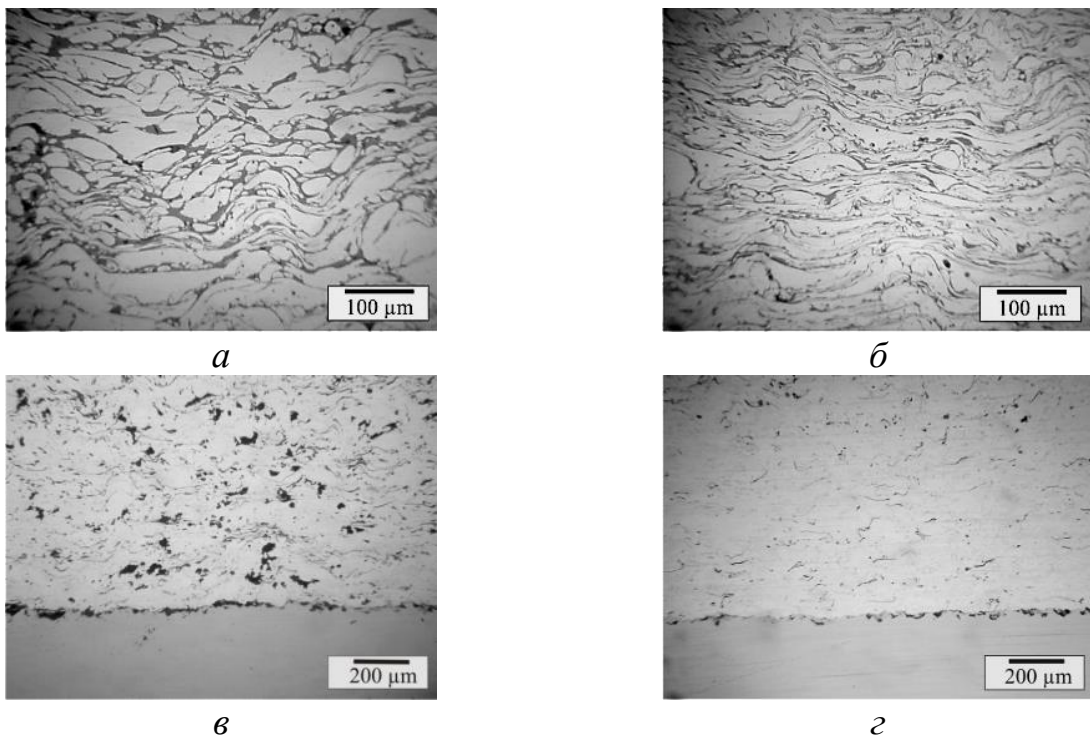


Рисунок 3 – Мікроструктури покриттів, напилених за традиційною технологією (а – електродугове із дроту Св-08Г2С, в – плазмове з порошку ПГ-19М-01) та з використанням електроімпульсної дії на оптимальних амплітудно-частотних параметрах (б – електродугове, г – плазмове)

У результаті визначення міцності зчеплення з основою встановлено, що використання електроімпульсної дії забезпечує підвищення даної характеристики для електродугового покриття з дроту Св-08Г2С з 26 МПа до 34 МПа, для плазмового з ПГ-19М-01 – з 17 МПа до 22 МПа. Аналіз площі відриву зразків (рис. 4) показав, що спостерігається збільшення площі фактичного контакту напилюваних частинок з основою та кількості місць зчеплення, що забезпечує зменшення результуючого навантаження на одиницю площі нанесеного покриття. Пояснюється даний ефект підвищеною швидкістю напилюваних частинок.

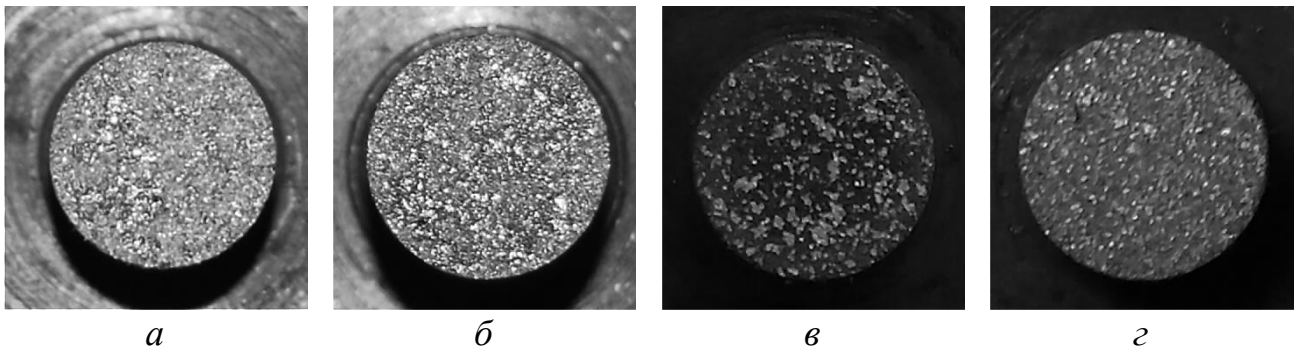


Рисунок 4 – Зразки після випробувань на міцність зчеплення електродугових (а,б) та плазмових покриттів (в,г): а, в – напилення проводили за традиційною технологією; б, г – з використанням електроімпульсної дії

Зносостійкість електродугових та плазмових покриттів визначали за схемою диск-колодка при наступних умовах: швидкість подачі мастила марки М10Г2К складала 1 г/хв, окружна швидкість обертання диска – 0,8 м/с, тиск на колодку – 4 МПа. Колодку і диск виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45. Плазмові покриття наносили на колодку, а електродугові на диск на оптимальних амплітудо-частотних параметрах електроімпульсної дії. Такий вибір пояснюється тим, що електродуговим методом, в основному, відновлюють деталі типу «вал», а плазмовим методом наносять бронзові покриття на підшипники ковзання. Колодки та диски (відповідно до методу напилення) піддавалися термічному поліпшенню після чого їх твердість складала 30 ... 32 HRC. Знос покриттів визначали за втратою маси зразка через кожні 10 км пройденого шляху після притирання. Аналіз результатів визначення зносостійкості (рис. 5) показав, що електродугове покриття, нанесене з використанням електроімпульсної дії на оптимальних амплітудно-частотних параметрах, має в 1,7 рази менший знос, ніж покриття, напилене за традиційною технологією. Плазмове покриття, нанесене з використанням електроімпульсної дії, має в 1,5 рази менший знос, ніж покриття, напилене за традиційною технологією.

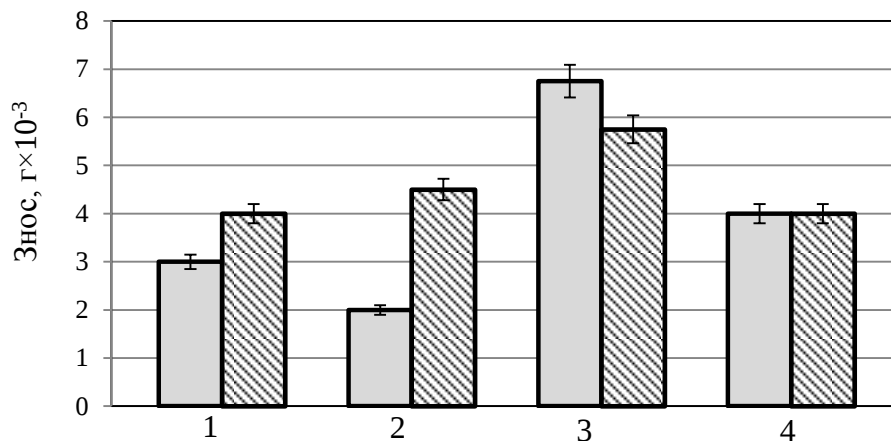


Рисунок 5 – Результати визначення зносостійкості покриттів: 1 – плазмових з порошку ПГ-19М-01, нанесених за традиційною технологією; 2 – плазмових з порошку ПГ-19М-01, нанесених з використанням електроімпульсної дії; 3 – електродугових з дроту Св-08Г2С нанесених за традиційною технологією, 4 – електродугових з дроту Св-08Г2С, нанесених з використанням електроімпульсної дії: – покриття; – контролі

Аналіз поверхонь тертя покриттів показав, що при заданих умовах для досліджуваних зразків характерне механохімічне зношування, що супроводжується виникненням на поверхні сполученої пари збагачених киснем плівок. Поверхні тертя покриттів, напилених з використанням електроімпульсної дії на оптимальних амплітудно-частотних параметрах являються більш щільними та мають пористість в 2 рази меншу, ніж покриття напилени за традиційною технологією. Також видні сліди тертя меншої глибини, які більш рівномірно розташовані по поверхнях тертя, що призводить до меншого зносу. Збільшення зносостійкості пов'язане з підвищенням твердості покриттів: електродугового на 35 %, плазмового на 24 % та більш щільною структурою поверхонь тертя.

Для подальшого підвищення фізико-механічних властивостей отриманих покриттів, напилених з використанням електроімпульсної дії встановлено оптимальні режими їх передрекristалізаційної термічної обробки, які визначалися за показниками твердості при різній тривалості витримки зразків (рис. 6). Згідно з представленими даними встановлено, що залежність носить екстремальний характер з виразним максимумом, при цьому відповідну температуру і витримку можна вважати оптимальними. Зменшення твердості при підвищенні тривалості витримки пояснюється збільшенням розміру субзерен через збільшення рухливості субмеж.

Значення твердості електродугових покриттів підвищуються після передрекristалізаційної термічної обробки при температурі 450 °С і витримці 2 хв для покриття, нанесеного за традиційною технологією з 2 ГПа до 2,6 ГПа. Для покриття, нанесеного з використанням електроімпульсної дії, оптимальною є витримка 1 хв при температурі 400 °С при цьому значення твердості підвищується з 2,7 ГПа до 3 ГПа, тобто ще на 12%, а у порівнянні з покриттями, напиленими за традиційною технологією – на 50 %.

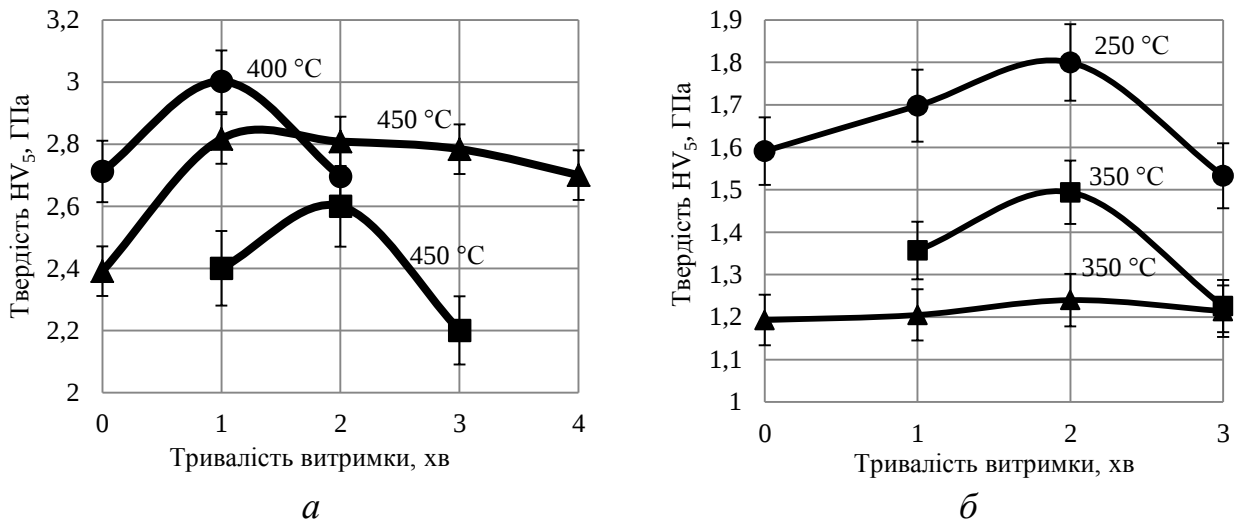


Рисунок 6 – Залежність твердості електродугових покриттів з дроту Св-08Г2С (а) та плазових покриттів з ПГ-19М-01(б) від тривалості витримки при передрекristалізаційній термічній обробці:
 ■ – нанесених за традиційною технологією;
 ▲, ● – з використанням електроімпульсної дії

Аналогічна залежність спостерігається і для плазових покриттів (рис. 6 б). Оптимальний режим передрекristалізаційної термічної обробки для плазового покриття з порошку ПГ-19М-01, нанесеного за традиційною технологією, полягає у нагріванні до температури 350 °C і витримці протягом 2 хв та забезпечує підвищення твердості з 1,3 ГПа до 1,5 ГПа. Для покриття, напilenого із застосуванням електроімпульсної дії, оптимальний режим термічної обробки також зміщується в область більш низьких температур і полягає у нагріванні до 250 °C і витримці протягом 2 хв. При цьому твердість збільшується з 1,6 ГПа до 1,8 ГПа, тобто ще на 13%, а у порівнянні з покриттями, напиленими за традиційною технологією – на 38 %. Таким чином, можна зробити висновок, що для покриттів, напилених із застосуванням електроімпульсної дії, оптимальний режим передрекristалізаційної термічної обробки зміщується у діапазон менших температур і витримок. Це пояснюється більш високим ступенем деформації частинок при формуванні покриттів за рахунок їх підвищеної швидкості.

Аналіз мікроструктур (рис. 7) показав, що змін у структурі покриттів до і після термообробки не спостерігається. Це свідчить про те, що зміцнювальний ефект забезпечують структурні елементи, розмір яких менший за 0,5 мкм, що пояснюється роздільною здатністю людського ока та оптичного мікроскопа. Тому для кількісної оцінки впливу передрекristалізаційної термічної обробки на субструктуру електродугових з дроту Св-08Г2С та плазових з порошку марки ПГ-19М-01 покриттів провели визначення розмірів ОКР рентгенівського випромінювання (табл. 1).

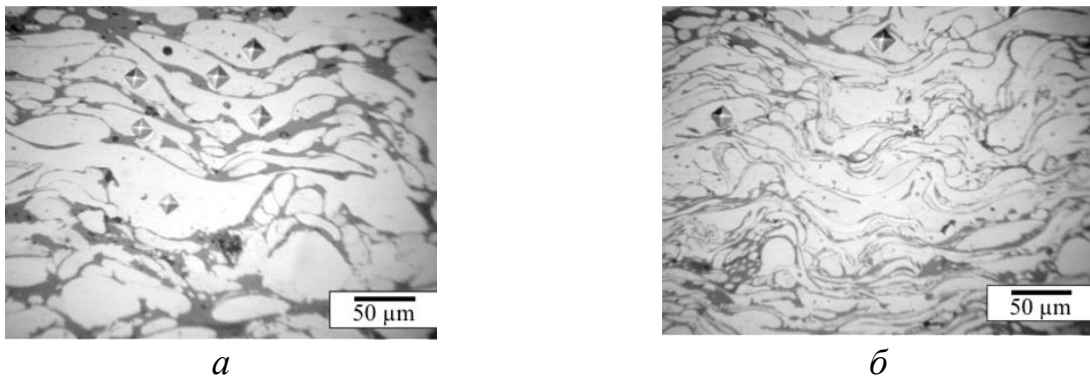


Рисунок 7 – Мікроструктура покриття з дроту марки Св-08Г2С після передрекристалізаційної термічної обробки на оптимальному режимі: *а* – за традиційною технологією; *б* – з використанням електроімпульсної дії

Згідно з приведеними даними при використанні електроімпульсної дії на гетерофазний високотемпературний струмінь у процесі напилення спостерігається зменшення ОКР рентгенівського випромінювання, що пояснюється здрібненням субструктури покриттів, оскільки їх розмір ототожнюється із середнім розміром кристалітів. Після подальшої передрекристалізаційної термічної обробки, вище названих покриттів, ОКР мають значно менші значення у порівнянні з термообробленими покриттями, отриманими за традиційною технологією.

Таблиця 1. Розмір ОКР рентгенівського випромінювання електродугових та плазмових покриттів

Покриття	Технологія напилення та величина деформації частинок	Термообробка	Розмір ОКР, нм
Електродугові покриття з дроту Св-08Г2С	За традиційною технологією. Деформація 83%.	Без термічної обробки	225
		450 °С, 2хв	106
	З використанням електроімпульсної дії. Деформація 87%.	Без термічної обробки	205
		400 °С, 1 хв	87
Плазмові покриття з порошку ПГ-19М-01	За традиційною технологією. Деформація 80%.	Без термічної обробки	599
		350 °С, 2хв	345
	З використанням електроімпульсної дії. Деформація 83%.	Без термічної обробки	534
		250 °С, 2хв	218

Так, ОКР електродугового покриття зменшується з 106 нм до 87 нм, а плазмового з 345 нм до 218 нм. Таким чином, аналіз отриманих даних дає підстави стверджувати, що проведення передрекристалізаційної термічної обробки дозволяє отримувати субзеренну структуру наномасштабного розміру. Пояснюється це тим, що після проведення термічної обробки покриттів,

напилених з використанням електроімпульсної дії, формуються субзерна меншого розміру за рахунок більшого ступеня деформації частинок.

Основним недоліком передрекristалізаційної термічної обробки є невелика тривалість витримки у декілька хвилин, тому актуальним являється дослідження можливості стабілізації здрібненої полігонізаційної субструктури напиленого покриття при більш тривалій витримці у процесі передрекristалізаційної термічної обробки за рахунок наступної деформації, оскільки вона створюватиме дислокаційні бар'єри та сплетіння, які гальмуватимуть рух субмеж.

Для досліджень обрали електродугові покриття з дроту 12X18H10T, оскільки попередні експерименти показали, що для даного матеріалу характерний високий приріст твердості після проведення передрекristалізаційної термічної обробки. Також даний дріт часто застосовується для отримання захисних покриттів. Наступну деформацію покриття здійснювали на гідравлічному пресі при навантаженні 20 т. Величина деформації складала 15 %. Отримані зразки з покриттями нагрівали у печі до температури початку первинної рекristалізації матеріалу покриття, яка складає 600 °С. Оптимальний режим передрекristалізаційної термічної обробки визначали за показниками твердості за Віккерсом. Результати вимірювання твердості приведені на рис. 8. Твердість покриття після напилення, нанесеного за традиційною технологією, складала 2,4 ГПа. При використанні електроімпульсної дії твердість покриття підвищилася до 2,8 ГПа.

Аналіз приведених графіків показує, що використання наступної деформації покриттів забезпечує менше зниження їх твердості при підвищенні тривалості витримки при передрекristалізаційній термічній обробці до 20 хв. Дана тенденція спостерігається для обох способів нанесення електродугового покриття. Так, наприклад, твердість покриття, напиленого за традиційною технологією, при підвищенні тривалості витримки з 5 хв до 20 хв без наступної деформації зменшується з 3,2 ГПа до 2,8 ГПа (-13 %), а при проведенні наступної деформації лише з 3,9 ГПа до 3,8 ГПа (-3 %).

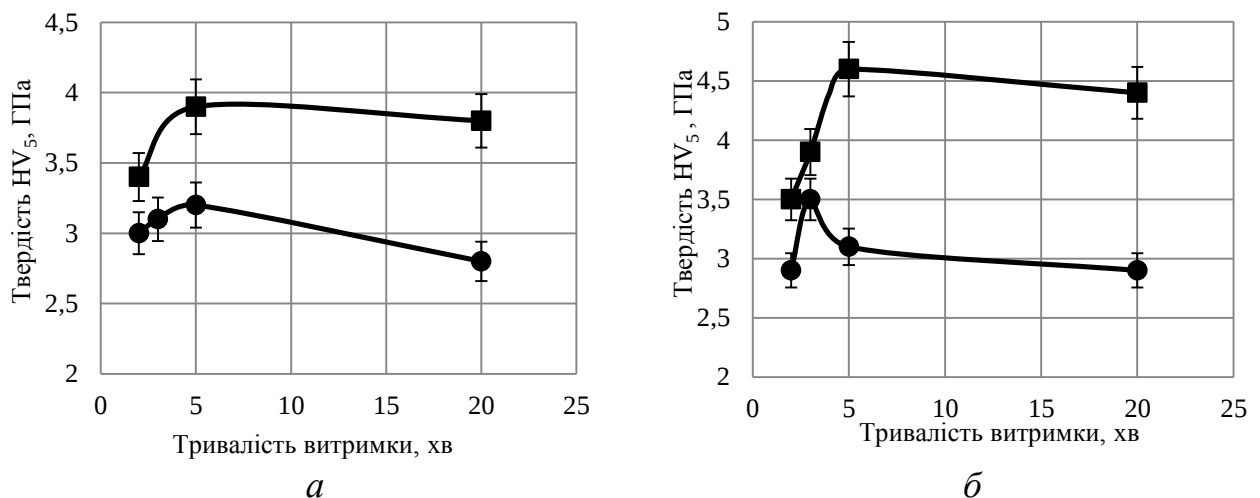


Рисунок 8 – Залежність твердості електродугових покриттів з дроту 12X18H10T напилених за традиційною технологією (а) та з використанням високовольтної електроімпульсної дії (б) від тривалості витримки при термічній обробці:

● – після напилення; ■ – після напилення та наступної деформації (15%)

Але при використанні електроімпульсної дії при напиленні спостерігається підвищення твердості після наступної деформації та термічної обробки (витримка 20 хв) на 83 %, а при використанні традиційної технології – на 58 %. Даний ефект пояснюється підвищенням величини деформації частинок за рахунок збільшення їх підлітної швидкості про що свідчить аналіз мікроструктур отриманих покриттів (рис. 9).

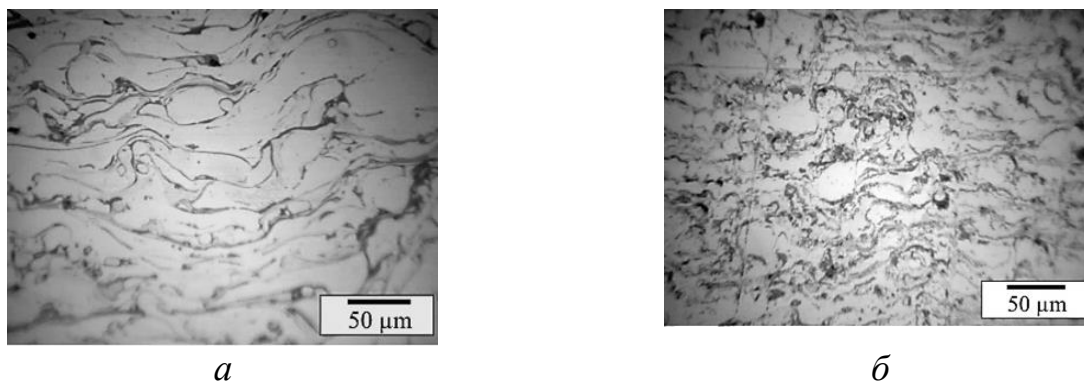


Рисунок 9 – Мікроструктура напиленого електродугового покриття із дроту марки 12X18H10T після наступної деформації та передрекристалізаційної термічної обробки на оптимальному режимі: а – за традиційною технологією; б – з використанням електроімпульсної дії

Згідно з даними по визначенню ОКР (табл. 2), покриття, отримані з використанням електроімпульсної дії характеризуються меншим їх значенням та наномасштабним розміром.

Таблиця 2. Розмір ОКР електродугових покриттів з дроту 12X18H10T

Покриття	Обробка	ОКР, нм
Напилення за традиційною технологією	Після напилення	394
	Після термічної обробки (5 хв, 600°C)	153
	Після термічної обробки (20 хв, 600°C)	342
	Деформація 15%	164
	Деформація 15% та термічна обробка (5 хв, 600°C)	87,5
	Деформація 15% та термічна обробка (20 хв, 600°C)	237
Напилення з використанням електроімпульсної дії	Після напилення	352
	Після термічної обробки (5 хв, 600°C)	123
	Після термічної обробки (20 хв, 600°C)	326
	Деформація 15%	154
	Деформація 15% та термічна обробка (5 хв, 600°C)	82
	Деформація 15% та термічна обробка (20 хв, 600°C)	198

Пояснюється це тим, що при здійсненні повторної деформації дислокаційна взаємодія закінчується виникненням від 50 % до 75 % дислокаційних бар'єрів (Хірта, Ломер-Коттрелла) решта бере участь у формуванні дислокаційних сплетінь. Дані дислокаційні бар'єри, які виникають вздовж напрямку, перпендикулярного осі деформації, стримують рух дислокацій та, як наслідок, зменшують рухливість полігонізаційних субмеж,

таким чином, знижуючи швидкість полігонізаційних процесів, забезпечують стабілізуючий ефект. Отже, термічна обробка протягом 20 хв повторно деформованих покриттів забезпечує отримання дрібнішої субструктури у порівнянні з покриттями після напилення.

П'ятий розділ присвячений дослідно-промислому впровадженню розробленої технології електродугового та плазмового напилення з електроімпульсною дією на гетерофазний високотемпературний струмінь. Розроблені технологічні рекомендації впроваджені на підприємствах ТОВ «Зернозаготівельна компанія «Прометей», фермерському господарстві «Покровські ворота» та ООО «АГРОВОЛЯ» щодо відновлення посадочних місць під підшипники та поршнів гідравлічного обладнання, що дозволяє знизити собівартість відновлення вказаних деталей у середньому на 30% та збільшити ресурс їх роботи у порівнянні з традиційним напиленням на 30...40%.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу – удосконалення технології електродугового та плазмового напилення щодо підвищення фізико-механічних властивостей покриттів за рахунок використання електроімпульсної дії. У результаті виконання роботи отримано такі основні результати:

1. Серед методів ГТН найпоширенішими являються електродуговий та плазмовий, що пояснюється їх універсальністю та продуктивністю. До недоліків обох методів слід віднести низькі фізико-механічні та експлуатаційні властивості, зокрема високу пористість та низьку міцність зчеплення з основою покриттів, напилених за традиційною технологією, що викликає потребу подальшого їх розвитку.

2. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей електродугових та плазмових покриттів електроімпульсною дією на високотемпературний гетерофазний потік за рахунок здрібнення та прискорення частинок дисперсної фази.

3. Визначені оптимальні амплітудно-частотні параметри електроімпульсної дії при електродуговому напиленні дроту із Св-08Г2С (частота імпульсів 6,5 кГц, амплітуда – 5 кВ) та плазмовому напиленні порошку ПГ-19М-01 (частота імпульсів 5 кГц, амплітуда – 5 кВ), які забезпечують підвищення твердості електродугового та плазмового покриттів на 35 % та 24 % відповідно.

4. Показано, що застосування електроімпульсної дії на оптимальних параметрах призводить до зменшення середнього розміру частинок при електродуговому напиленні дроту Св-08Г2С з 84 мкм до 54 мкм, при плазмовому напиленні порошку ПГ-19М-01 – з 50 мкм до 42 мкм, підвищення їх середньої підлітної швидкості на 20 % та 25 % відповідно за рахунок

інтенсифікації здрібнення частинок та надання їм додаткової кінетичної енергії у зовнішньому електричному полі.

5. Встановлено, що використання електроімпульсної дії на оптимальних параметрах забезпечує: підвищення міцності зчеплення електродугового з дроту Св-08Г2С та плазмового з порошку ПГ-19М-01 покриттів на 30% та 18%, зносостійкості в 1,7 та 1,5 рази, зменшення пористості з 6 % до 3 % та з 8 % до 5 % та коефіцієнту теплопровідності на 12 % та 10 % відповідно.

6. Визначені оптимальні режими передрекristалізаційної термічної обробки електродугового та плазмового покриттів із зазначених матеріалів, напилених з використанням електроімпульсної дії, що забезпечують підвищення твердості у середньому на 15 % у порівнянні з аналогічно термообробленими покриттями, нанесеними за традиційною технологією, за рахунок формування субзерен наномасштабного розміру для електродугового напилення та їх здрібнення при плазмовому. Для електродугового покриття з дроту Св-08Г2С режим полягає у нагріванні до температури 400 °С, витримці протягом 1хв та охолодженні на повітрі, для плазмового покриття з порошку ПГ-19М-01: нагрівання до температури 250 °С, витримка протягом 2 хв, охолодження на повітрі.

7. Встановлено, що проведення наступної пластичної деформації покриттів (15%), напилених як із використанням електроімпульсної дії так і за традиційною технологією, дозволяє збільшити час витримки при передрекristалізаційній термічній обробці (до 20 хв) без суттєвого зниження твердості за рахунок зниження рухливості малокутових полігонізаційних субмеж.

8. Розроблено технологічні рекомендації щодо відновлення посадочних місць під підшипники електродуговим напиленням та поршнів гідроциліндрів плазмовим напиленням з використанням електроімпульсної дії, які впроваджені на підприємствах: ТОВ «Зернозаготівельна компанія «Прометей», ФГ «Покровські ворота» та ООО «АГРОВОЛЯ», що дозволило знизити вартість ремонту у середньому на 30 % та підвищити ресурс їх роботи на 30...40 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Дубовий О.М. Вплив електричних імпульсів на структуру та твердість електродугових покриттів [Текст] / О.М. Дубовий, В.М. Овсянников, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров, К.В. Овсянникова // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2012. – № 5–6. – С. 38 – 41.

2. Дубовой А.Н. Повышение эксплуатационных свойств электродуговых и плазменных покрытий электроимпульсным воздействием на двухфазный высокотемпературный поток [Текст] / А.Н. Дубовой, А.А. Карпеченко, М.Н. Бобров // Автоматическая сварка. – 2014. – № 8 (734). – С. 39 – 43.

3. Dybovoy A.N. Influence of electric impulse impact on the mechanical properties of plasma coatings [Текст] / A.N. Dybovoy, A.A. Karpechenko, M.N.

Bobrov, A.A. Novikov // Shipbuilding & marine infrastructure. – 2015. – №1 (3). – P. 102 – 110.

4. Пат. 107988 Україна, МПК (2015.01) C23C 4/00 Спосіб електродугового напилення покриття / Дубовий О.М., Карпеченко А.А., Овсянников В.М., Бобров М.М.: заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № 107988; заявл. 22.04.2013; опубл. 10.03.2015, бюл. № 5.

5. Дубовой А.Н. Улучшение эксплуатационных свойств напыленных покрытий электроимпульсным воздействием на двухфазный высокотемпературный поток с последующей термической обработкой [Текст] / А.Н. Дубовой, А.А. Карпеченко, М.Н. Бобров // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2014. – № 4. – С. 60 – 64.

6. Дубовий О.М. Вплив передрекристиалізаційної термічної обробки на субструктуру і твердість деформованих кольорових металів і сплавів та напилених покриттів [Текст] / О.М. Дубовий, О.В. Бондаренко, О.О. Жданов, О.В. Жишко, М.М. Бобров, Т.С. Галкіна // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2012. – № 2. – С. 47 – 53.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Бобров М.М. Вплив електричних імпульсів на твердість та структуру електродугових покриттів [Текст] / М.М. Бобров // Макаровські читання: матеріали Всеукр. форуму молодих науковців – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 9 – 10.

8. Бобров М.М. Вплив електричних імпульсів на твердість та структуру електродугових покриттів [Текст] / М.М. Бобров // Зварювання та споріднені процеси і технології: Матеріали II Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, молодих науковців – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 77 – 79.

9. Карпеченко А.А. Дослідження можливостей підвищення твердості електродугових покриттів накладенням електричних імпульсів [Текст] / А.А. Карпеченко, М.М. Бобров, К.В. Овсянникова // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали III Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 174 – 177.

10. Бобров М.М. Вплив електричних імпульсів на структуру та твердість плазмових покриттів [Текст] / М.М. Бобров, О.О. Новіков // Макаровські читання: матеріали Всеукр. форуму молодих науковців – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 103.

11. Дубовий О.М. Дослідження впливу електроімпульсної дії на властивості електродугових покриттів [Текст] / О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали IV Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 141 – 142.

12. Дубовий О.М. Одержання електродугових покриттів з підвищеними фізико-механічними властивостями [Текст] / О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров // Сварка и родственные технологии: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. – Киев, 2013. – С. 97.

13. Дубовий О.М. Вплив електричних імпульсів на структуру та твердість електродугових покриттів [Текст] / О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М.

Бобров // Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Киев, 2013. – С. 171.

14. Казимиренко Ю.А. Технологические направления развития электродугового напыления для формирования композиционных покрытий [Текст] / Ю.А. Казимиренко, А.А. Карпеченко, М.Н. Бобров // Быстрозакаленные материалы и покрытия: материалы 12-ой Всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф. – Москва, 2013. – С. 349 – 354.

15. Новиков А.А. Расчет скорости и температуры частиц порошка при плазменном нанесении покрытий [Текст] / А.А. Новиков, М.Н. Бобров, // Макаровські читання: матеріали Всеукр. форуму молодих науковців – Миколаїв: НУК, 2014. – С. 64 – 65.

16. Карпеченко А.А. Применение электроимпульсного воздействия при плазменном напылении для обеспечения повышенных эксплуатационных свойств покрытий [Текст] / А.А. Карпеченко, М.Н. Бобров // Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій та Зварювання та споріднення процеси і технології: матеріали наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2014. – С. 50 – 53.

17. Карпеченко А.А. Получение электродуговых покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами электроимпульсным воздействием на высокотемпературный двухфазный поток [Текст] / А.А. Карпеченко, М.Н. Бобров // Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій та Зварювання та споріднення процеси і технології: матеріали наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2014. – С. 53 – 55.

18. Карпеченко А.А. Влияние предрекристаллизационной термической обработки на твердость электродуговых и плазменных покрытий нанесенных с электроимпульсным воздействием на высокотемпературный поток [Текст] / А.А. Карпеченко, М.Н. Бобров // Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій та Зварювання та споріднення процеси і технології: матеріали наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2014. – С. 55 – 57.

19. Дубовий О.М. Підвищення зносостійкості напилених покриттів електроімпульсним впливом на двофазний високотемпературний потік [Текст] / О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2014. – С. 178 – 180.

20. Дубовий О.М. Дослідження можливості фіксації полігонізаційної субструктури плазмового покриття повторною деформацією та термічною обробкою [Текст] / О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров, А.М. Ткаченко // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2014. – С. 183 – 184.

21. Дубовой А.Н. Повышение твердости и снижение пористости электродуговых восстановительных покрытий электроимпульсным воздействием и термической обработкой [Текст] / А.Н. Дубовой, А.А. Карпеченко, М.Н. Бобров // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд:

матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. з міжн. участю. – Миколаїв: НУК, 2015. – С. 85 – 88.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

22. Бобров М.М. Експериментальне визначення швидкості частинок при плазмовому та електродуговому напилюванні покриттів [Текст] / М.М. Бобров, В.О. Малихін // Зб. наук. праць студентів НУК. – Миколаїв: НУК, 2010. – №2. – С. 13 – 18.

23. Дубовий О.М. Вплив деформації та легуючих елементів на твердість сталей і напилених покриттів після передрекristалізаційної термічної обробки [Текст] / О.М. Дубовий, С.Г. Кулік, О.О. Жданов, М.М. Бобров, О.І. Мирко // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2011. – № 2. – С. 36 – 44.

24. Карпеченко А.А. Вплив способу плазмового напилення на мікроструктуру і твердість покриттів після передрекristалізаційної термічної обробки [Текст] / А.А. Карпеченко, С.А. Лой, М.М. Бобров, О.О.Жданов, Н.В. Бич // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2013. – № 3. – С. 28 – 32.

25. Пат. 95378 Україна, МПК (2011.01) C21D 8/00. Спосіб деформаційно-термічної обробки металів та сплавів / Дубовий О.М., Янковець Т.А., Лебедєва Н.Ю., Казимиренко Ю.О., Жданов О.О., Бобров М.М.: заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № 95378; заявл. 01.03.2010; опубл. 25.07.2011, бюл. № 14.

АНОТАЦІЯ

Бобров М.М. Підвищення фізико-механічних властивостей електродугових та плазмових покриттів електроімпульсною дією на гетерофазний високотемпературний струмінь. – Рукопис.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології». – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2015 р.

Дисертація присвячена розробці технологічних основ та практичних рекомендацій щодо підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей електродугових (на прикладі Св-08Г2С, 12Х18Н10Т) та плазмових покриттів (на прикладі бронзових покриттів із порошку марки ПГ-19М-01) шляхом електроімпульсної дії на гетерофазний високотемпературний струмінь.

Досліджено вплив амплітудно-частотних параметрів електроімпульсної дії на мікроструктуру, твердість електродугових і плазмових покриттів та на основі отриманих даних встановлені оптимальні її параметри, що забезпечують максимальний рівень фізико-механічних властивостей отриманих покриттів. Так, для електродугового покриття з дроту Св-08Г2С режим полягає у використанні високовольтних електричних імпульсів частотою 6,5 кГц та напругою 5 кВ; для плазмового з порошку ПГ-19М-01 – частотою 5 кГц, напругою 5 кВ.

Експериментально доведено, що використання електроімпульсної дії на оптимальних параметрах забезпечує: підвищення міцності зчеплення електродугового з дроту Св-08Г2С та плазмового з порошку ПГ-19М-01 покриттів на 30% та 18%, зносостійкості в 1,7 та 1,5 рази, зменшення пористості з 6 % до 3 % та з 8 % до 5 % та коефіцієнту теплопровідності на 12 % та 10 % відповідно. Показано, що застосування електроімпульсної дії на оптимальних параметрах призводить до зменшення середнього розміру частинок при електродуговому напиленні дроту Св-08Г2С з 84 мкм до 54 мкм, при плазмовому напиленні порошку ПГ-19М-01 – з 50 мкм до 42 мкм, підвищення їх середньої підлітної швидкості на 20 % та 25 % відповідно за рахунок інтенсифікації здрібнення частинок та надання їм додаткової кінетичної енергії у зовнішньому електричному полі.

Показано перспективу щодо подальшого підвищення твердості покриттів, напилених з використанням електроімпульсної дії, за рахунок їх передрекристалізаційної термічної обробки.

Ключові слова: електроімпульсна дія, електродугове напилення, плазмове напилення, фізико-механічні властивості, термічна обробка, міцність зчеплення, пористість, зносостійкість.

АННОТАЦИЯ

Бобров М.Н. Повышение физико-механических свойств электродуговых и плазменных покрытий электроимпульсным воздействием на гетерофазную высокотемпературную струю. – Рукопись.

Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 – «Сварка родственные процессы и технологии». – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2015.

Диссертация посвящена разработке технологических основ и практических рекомендаций по повышению физико-механических и эксплуатационных свойств электродуговых (на примере Св-08Г2С, 12Х18Н10Т) и плазменных покрытий (на примере бронзовых покрытий из порошка марки ПГ-19М-01) путем электроимпульсного воздействия на гетерофазную высокотемпературную струю.

В результате теоретических исследований впервые научно обоснована и экспериментально подтверждена возможность повышения физико-механических свойств электродуговых и плазменных покрытий электроимпульсным воздействием на высокотемпературную гетерофазную струю за счет измельчения и ускорения частиц дисперсной фазы.

Исследовано влияние амплитудно-частотных параметров такого воздействия на микроструктуру и твердость электродуговых и плазменных покрытий и на основе полученных данных установлены ее оптимальные параметры, которые обеспечивают максимальный уровень физико-механических свойств получаемых покрытий. Так, для электродугового покрытия из проволоки Св-08Г2С режим заключается в использовании

высоковольтных электрических импульсов частотой 6,5 кГц и напряжением 5 кВ; для плазменного из порошка ПГ-19М-01 – частотой 5 кГц, напряжением 5 кВ.

Экспериментально доказано, что использование электроимпульсного воздействия на оптимальных параметрах обеспечивает: повышение прочности сцепления электродугового из проволоки Св-08Г2С и плазменного из порошка ПГ-19М-01 покрытий на 30% и 18%, износостойкости в 1,7 и 1,5 раза, уменьшение пористости с 6% до 3% и с 8% до 5% и коэффициента теплопроводности на 12% и 10% соответственно. Показано, что применение электроимпульсного воздействия на оптимальных параметрах приводит к уменьшению среднего размера частиц при электродуговом напылении проволоки Св-08Г2С с 84 мкм до 54 мкм, при плазменном напылении порошка ПГ-19М-01 – с 50 мкм до 42 мкм, повышение их средней подлетной скорости на 20% и 25% соответственно за счет интенсификации измельчения частиц и предоставления им дополнительной кинетической энергии во внешнем электрическом поле.

Показано перспективу по дальнейшему повышению твердости покрытий, напыленных с использованием электроимпульсного воздействия, за счет их предрекристаллизационной термической обработки.

Установлена возможность повышения продолжительности выдержки при термической обработке покрытий путем проведения следующей пластической деформации (15%), что обеспечивает снижение подвижности малоугловых полигонизационных субграниц за счет формирования дислокационных барьеров.

В результате экспериментальных исследований разработаны технологические рекомендации, которые внедрены на предприятиях ООО «Зернозаготовительная компания» Прометей», фермерском хозяйстве «Покровские ворота», ООО «АГРОВОЛЯ» и используются для восстановления цапф деталей типа «вал» и поршней гидравлического оборудования.

Ключевые слова: электроимпульсное воздействие, электродуговое напыление, плазменное напыление, физико-механические свойства, термическая обработка, прочность сцепления, пористость, износостойкость.

ABSTRACT

Bobrov M.N. Increase the physical and mechanical properties electric-arc and plasma sprayed coatings by electro pulse impact on heterophasic high temperature jet. – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, on specialty 05.03.06 – Welding and allied processes and technology. National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, Nikolaev, 2015.

The thesis is devoted to development of technological bases and practical recommendations to improve the physical and mechanical properties electric arc (for example, Св-08Г2С, 12Х18Н10Т) and plasma sprayed coatings (for example, bronze powder coatings brands ПГ-19М-01) by means of electric action on heterophase high-temperature jet.

Influence of amplitude-frequency parameters of electric effect on microstructure and hardness and electric arc and plasma sprayed coatings based on data obtained optimum set of parameters that provide the maximum level of physical and mechanical properties of the coating. So for electric wire covering CБ-08Г2C mode is to use a high-frequency electrical pulses of 6.5 kHz and a voltage of 5 kV; Plasma powder ПГ-19М-01 – 5 kHz frequency, voltage of 5 kV.

Experimentally proved that the use of electric effect on the optimal parameters provides: increase the strength of the electric traction wire CБ-08Г2C and plasma powder ПГ-19М-01 coatings by 30% and 18%, durability 1.7 and 1.5 times reduction porosity of 6% to 3% and from 8% to 5% and thermal conductivity of 12% and 10% respectively. It is shown that the use of electric effect on the optimal parameters leads to a decrease in the average size of the particles in electric arc spraying wire CБ-08Г2C from 84 microns to 54 microns by plasma spraying powder ПГ-19М-01 – from 50 microns to 42 microns, increasing their average speed by 20% and 25% respectively due to the intensification of grinding particles and providing them with additional kinetic energy in an external electric field.

Showing prospects for further increasing hardness coatings sprayed using electric pulse action through their predrecrystallization heat treatment.

Keywords: electro pulse impact, electric arc spraying, plasma spraying, physical and mechanical properties, heat treatment, adhesion strength, porosity, wear resistance.