

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова**  
**Кораблебудівний навчально-науковий інститут**

Кафедра зварювального виробництва

«Допущений до захисту»  
Завідувач кафедри зварювального  
виробництва *Драган С.В.*

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»**

**на тему: «Удосконалення технології відновлювання деталей гідравлічного  
обладнання електродуговим методом»**

Виконав: студент 5121-з групи  
*Крамаренко В.А.*  
(підпис)

Керівник роботи:  
к.т.н., доцент  
*Лабарткава О.В.*  
(підпис)

Миколаїв – 2024 р.

## АНОТАЦІЯ

### ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ НА ТЕМУ: «УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ГІДРАВЛІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ МЕТОДОМ»

Дипломна робота містить: 89 аркушів, 6 частин, 18 рисунків, 16 таблиць, 1 креслення, 6 плакатів, 22 джерела інформації.

Об'єкт дослідження – сталеві електродугові покриття з дроту марки 65Г.

Мета дипломної роботи – дослідження та розробка технологічних рекомендацій щодо електродугового напилення сталевих покриттів на деталі гідравлічного обладнання.

Методи дослідження – комп'ютерна металографія, визначення твердості, міцності зчеплення з основою, зносостійкості сталевих електродугових покриттів.

Дослідження полягає в вивченні можливості створення покриттів з підвищеними механічними та експлуатаційними властивостями за рахунок модернізації електродугового розпилювача ЕМ-14М. В роботі досліджено вплив конструкційних та технологічних параметрів на процес формування електродугового покриття зі сталі 65Г. Крім того, досліджено вплив параметрів режиму напилення на мікроструктуру, твердість, міцність зчеплення покриттів з основою та зносостійкість. У роботі розглянуті питання охорони праці і охорони навколишнього середовища з урахуванням розроблених технологічних рекомендацій щодо напилення покриттів модернізованим електродуговим розпилювачем на штоки гідроциліндру, розрахована економічна ефективність даної розробки.

ЕЛЕКТРОДУГОВИЙ РОЗПИЛЮВАЧ, МІКРОСТРУКТУРА ПОКРИТТЯ,  
ТВЕРДІСТЬ, МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

## ABSTRACT

### DIPLOMA WORK ON THE TOPIC: “IMPROVED TECHNOLOGICAL IMPROVEMENT OF HYDRAULIC PARTS USING THE ELECTRIC ARC METHOD”

The diploma work contains: 89 arches, 6 parts, 18 drawings, 16 tables, 1 armchair, 6 posters, 22 pieces of information.

The object of investigation is steel electric arc coatings of grade 65G.

Meta of the thesis – research and development of technological recommendations for electric arc filing of steel coatings on hydraulic components.

Investigation methods – computer metallography, determination of hardness, strength of bonding to the base, wear resistance of steel electric arc coatings.

The investigation lies in the increased feasibility of creating coatings with advances in mechanical and operational authorities for the modernization of the electric arc sawing machine EM-14M. The robot examined the influx of design and technological parameters into the process of forming an electric arc coating in steel 65G. In addition, the influence of the parameters of the sawing mode on the microstructure, hardness, strength of the coating on the base and wear resistance was observed. The robot examines the nutritional protection of the praci and the protection of the excess medium with the support of detailed technological recommendations for filing the coatings with modernized electric arc sawing on the hydraulic cylinder rods, economical the effectiveness of this procedure.

ELECTRIC ARC ROZPILYUVACH, COATING MICROSTRUCTURE,  
HARDNESS, MICNICIANITY, WEAR RESISTANCE.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| АННОТАЦІЯ .....                                                                                                                                      | 7  |
| ВСТУП .....                                                                                                                                          | 9  |
| 1 СТАН, ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА ЗАСТОСУВАННЯ<br>ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ .....                                                                       | 11 |
| 1.1 Аналіз технологій зміцнення і умов експлуатації деталей гідравлічного<br>обладнання .....                                                        | 11 |
| 1.2 Аналіз перспективних напрямків підвищення якості електродугових<br>покриттів .....                                                               | 14 |
| 1.3 Аналіз джерел інформації щодо отримання та застосування<br>композиційних електродугових покриттів .....                                          | 18 |
| 1.4 Аналіз джерел інформації щодо отримання наноструктурних елементів<br>у структурі електродугового покриття .....                                  | 19 |
| 1.5 Вибір обладнання для отримання покриттів електродуговим методом<br>.....                                                                         | 22 |
| 1.6 Постановка задачі дипломної роботи .....                                                                                                         | 26 |
| 2 МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РОЗПИЛЮВАЧА ЩОДО<br>ОТРИМАННЯ СТАЛЕВИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ З<br>ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ..... | 29 |
| 2.1 Дослідження впливу конструкційних та технологічних параметрів на<br>процес формування сталевих електродугових покриттів .....                    | 29 |
| 2.2 Розрахунок оптимального режиму електродугового напилення<br>покриття .....                                                                       | 31 |
| 2.2.1 Розрахунок швидкості витікання повітря з сопла електродугового<br>розпилювача ЕМ-14М.....                                                      | 31 |
| 2.2.2 Розрахунок швидкості частинок.....                                                                                                             | 34 |
| 2.2.3 Розрахунок швидкості частинок та повітря у поперечному перерізі ....                                                                           | 36 |
| 2.2.4 Розрахунок температури повітря.....                                                                                                            | 38 |

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

|       |                                                                                                                                                       |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.5 | Вибір оптимальних технологічних параметрів напилення електродугових сталевих покриттів .....                                                          | 39 |
| 2.3   | Модернізація електродугового розпилювача щодо отримання сталевих електродугових покриттів з підвищеними фізико-механічними властивостями .....        | 40 |
| 3     | АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ ОТРИМАНИХ МОДЕРНІЗОВАНИМ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ РОЗПИЛЮВАЧЕМ ЕМ-14М ..... | 44 |
| 3.1   | Використані матеріали та обладнання для формування електродугових покриттів .....                                                                     | 44 |
| 3.2   | Дослідження гранулометричного складу напилюваних частинок .....                                                                                       | 45 |
| 3.3   | Дослідження швидкості частинок у високотемпературному струмені при електродуговому напиленні сталі 65Г .....                                          | 47 |
| 3.4   | Дослідження мікроструктури отриманих покриттів .....                                                                                                  | 49 |
| 3.5   | Дослідження міцності зчеплення покриттів з основою .....                                                                                              | 51 |
| 3.6   | Дослідження зносостійкості покриттів.....                                                                                                             | 53 |
| 4     | РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО НАНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ МОДЕРНІЗОВАНИМ РОЗПИЛЮВАЧЕМ ЕМ-14М .....                                  | 60 |
| 4.1   | Вибір і підготовка матеріалів, які застосовуються при нанесенні газотермічних покриттів.....                                                          | 60 |
| 4.2   | Підготовка поверхні під нанесення газотермічного покриття .....                                                                                       | 61 |
| 4.3   | Напилення газотермічного покриття .....                                                                                                               | 63 |
| 4.4   | Визначення фізико-механічних властивостей напилених покриттів ...                                                                                     | 65 |
| 5     | РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ НАНЕСЕННІ ПОКРИТТІВ.....                                                                                      | 67 |
| 5.1   | Аналіз шкідливих та небезпечних факторів, що впливають на персонал під час напилення електродугових покриттів .....                                   | 68 |
| 5.2   | Вимоги техніки безпеки при напилюванні покриттів електродуговим методом .....                                                                         | 71 |

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НАНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ РОЗРОБЛЕНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ..... | 75 |
| 6.1 Вхідні дані.....                                                                                                   | 76 |
| 6.2 Розрахунок зміни собівартості .....                                                                                | 76 |
| 6.3 Розрахунок одночасних витрат на впровадження сталевих покриттів, отриманих електродуговим методом .....            | 77 |
| 6.4 Розрахунок технологічної собівартості .....                                                                        | 77 |
| 6.5 Техніко-економічні показники нанесення покриттів електродуговим методом .....                                      | 82 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ .....                                                                                      | 85 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....                                                                                   | 88 |

|     |       |             |        |      |                                                               |
|-----|-------|-------------|--------|------|---------------------------------------------------------------|
|     |       |             |        |      | <div> <div>КР.131.5121з.01.00.ПЗ</div> <div>Лист</div> </div> |
|     |       |             |        |      |                                                               |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                                                               |

## ВСТУП

Рівень розвитку машинобудування на початку ХХІ століття характеризується підвищеною інтенсивністю режимів експлуатації машин і механізмів. Зміна та ускладнення умов роботи вузлів і агрегатів вимагає постійного вдосконалення технології їх виготовлення із забезпеченням достатньої надійності та довговічності. Експлуатаційні властивості деталей та механізмів, а також ресурс їх роботи, визначаються переважно фізико-механічними властивостями поверхні. Як показує статистичний аналіз, більшість машин (85 – 90%) виходять з ладу не через поломку, а у результаті зносу поверхонь окремих деталей. При відновленні зношених деталей останнім часом все частіше застосовують газотермічне напилення покриттів. Пояснюється це тим, що при усуненні зносу деталі, маса металу, що наноситься, зазвичай становить 2 – 4%, а вартість ремонту не перевищує 10 – 30% від вартості нової. Однак покриття, отримані за традиційними технологіями напилення, не завжди забезпечують достатній рівень експлуатаційних властивостей для ефективної роботи деталей та механізмів у заданих умовах.

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. Особливо високих показників фізико-механічних властивостей напилених покриттів можна досягти наноструктуруванням. Однак, на сьогодні методи отримання наноструктурних елементів по всьому об'єму покриття є досить складними і, як наслідок, дорогими з економічної точки зору.

Таким чином, розробка нових технологій відновлення і модернізація електродугового обладнання щодо підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей напилених покриттів, нанесених на деталі гідравлічного обладнання, є актуальним завданням.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

# 1 СТАН, ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ

## 1.1 Аналіз технологій зміцнення і умов експлуатації деталей гідравлічного обладнання

Гідроциліндри є об'ємними гідродвигунами, призначеними для перетворення енергії потоку робочої рідини в механічну енергію виконавчого механізму. Вихідною (рухомою) ланкою може бути як шток, так і корпус (гільза) гідроциліндра. Залежно від робочого циклу, швидкостей і зусиль, які повинні розвивати виконавчі механізми на будівельних, дорожніх, комунальних та інших самохідних машинах, застосовують гідроциліндри різних типів з різними способами їх включення в об'ємну гідропередачу (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Гідроциліндри різних типів

Українські заводи, що виробляють гідроциліндри серійно, виготовляють гільзи і штоки самостійно. Налагоджено виробництво гільз, поршнів, штоків, передніх втулок, робочі поверхні яких виконані по якості Н8 і відповідно f8.

Штоки гідроциліндрів виготовляють із сталевих поковок 30ХГСА, 40Х або 45. Перед шліфуванням проводять поверхневе гартування до HRC 38...40. Гільзи циліндрів виготовляють з безшовних гарячекатаних труб по ГОСТу 8732-78 зі

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

сталей 35 і 45 або легованих сталей 30ХГСА і 12Х18Н9Т. Поршні гідроциліндрів виготовляють зі сталей 35 і 45, їх поверхня наплавляються бронзовим покриттям марок БрОЦС 5-5-5 і БрАЖ 9-4.

Загальні технічні вимоги до гідроциліндрів встановлює ГОСТ 16514-87, згідно з яким робочі поверхні деталей гідроциліндрів повинні бути зносостійкими, корозійностійкими або мати захисні покриття. В якості захисних покриттів штоків і гільз циліндрів вітчизняного виробництва найбільш часто застосовують хромування за ГОСТом 9791-68. Висота нерівностей зовнішньої робочої поверхні штока після хромування і полірування повинна бути не більше Ra 0,16 мкм за ГОСТом 2789-73. Товщина покриття коливається в межах 20...40 мкм.

Відповідно до технічних вимог до якості деталей гідроциліндрів дефекти на робочих поверхнях штоків і гільз циліндрів не допускаються. До таких дефектів відносяться раковини, викришування хрому, тріщини і відшарування покриття.

При дрібносерійному виробництві гідравлічного обладнання проводиться закупка комплектуючих: хонінгованих або розкатаних труб і хромованих штоків, що поставляються дилерами фірм Італії, Німеччини, Румунії та ін. Однак тут нерідко виникають проблеми: комплектуючі для виробництва гідроциліндрів зарубіжних фірм не завжди відповідають вимогам конкретного виробництва.

Гідроциліндри робочого обладнання сміттєвозів працюють у важкому експлуатаційному режимі, тому до них пред'являються підвищені конструктивні і технологічні вимоги.

Штоки гідроциліндрів встановлені на робочих органах сміттєвозів працюють в умовах агресивного середовища. Поверхня штоків схильна до абразивного зношування в результаті попадання твердих частинок, що призводить до утворення раковин, вибоїн, тріщин, подряпин, утворення на їх місці слідів корозії, нерівностей. Такі дефекти (рис. 1.2) Призводять до великої втрати мастил з гідроциліндра, що призводить до забруднення навколишнього середовища і збільшення грошових витрат на експлуатацію сміттєвозів. Штоки робочих

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

органів сміттєвоза при перевертанні контейнерів зі сміттям відчувають ударні навантаження, в результаті чого вони згинаються.

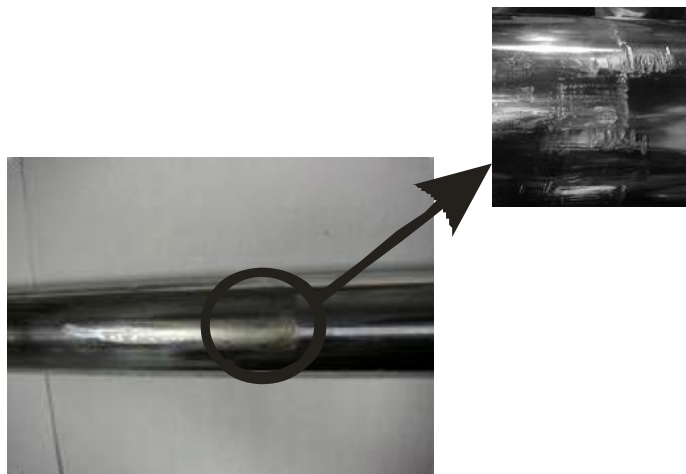


Рисунок 1.2 – Дефекти, що виникли в процесі експлуатації на робочій поверхні штока гідроциліндра

Комунальні служби зіткнулися ще з однією проблемою: хімічні реагенти, які використовуються взимку для обробки дорожнього покриття, провокують стрімку корозію, і протягом 2 – 3-х місяців виходять з ладу штоки гідроциліндрів, встановлені на дорожніх машинах. Це стосується в першу чергу до штоків з тонким шаром захисного хромового покриття.

Найбільш поширеним видом відновного ремонту зношених поверхонь гідроциліндра є методи наплавки високохромистими або порошковими дротами. Ремонт штоків гідроциліндра різними видами наплавлення не дає позитивних результатів через значне викривлення штоків, внутрішніх і зовнішніх тріщини, великих пір. Одним з недоліків наплавлення є неможливість повторного наплавлення, що істотно обмежує застосування даного методу.

Таким чином, застосування антифрикційних і зносостійких електродугових покриттів дозволяє значно знизити витрати дорогих матеріалів, що призводить до зниження собівартості відновлення деталей гідроциліндра і збільшує їх термін експлуатації. Розробка нових технологій зміцнення поверхні штоків гідроциліндрів електродуговим напиленням покриттів для багаторазового відновлення зовнішньої їхньої поверхні є актуальним завданням.

|     |       |             |        |      |                              |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|------------------------------|------|
|     |       |             |        |      | <p>КР.131.5121з.01.00.ПЗ</p> | Лист |
|     |       |             |        |      |                              |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                              |      |

## 1.2 Аналіз перспективних напрямків підвищення якості електродугових покриттів

Успішне вирішення задачі підвищення ефективності промислового виробництва пов'язано з розвитком відомих технологій та виникненням нових. Ці процеси пов'язані з захистом поверхні деталі та конструкції від корозії, зношування, наданням поверхні нових контрольованих властивостей.

Досвід багатьох вітчизняних підприємств та інформація з міжнародних джерел свідчить про те, що використання засобів газотермічного нанесення покриттів з кожного з вищевказаних напрямків дає значний техніко-економічний ефект [19].

В металургії та машинобудуванні вже більше за половину століття успішно використовуються методи газотермічного напилення покриттів, що надають поверхні виробів нові необхідні фізико-механічні та експлуатаційні властивості.

Станом на початок двадцять першого століття результати аналізу, проведеного консалтинговою фірмою The Technical Center for Mechanical Engineers (CETIM) (Франція), вказують на те, що світовий обсяг ринку технологій газотермічного напилення складає 1600 млн. євро, а прогнозоване зростання протягом першого десятиріччя складе 25%, при цьому відносна вартість електродугових покриттів в 3...10 разів нижча за інші види покриттів, отриманих газотермічним напиленням. Щорічно близько 30% виплавленого металу витрачається лише на відновлення втрат від зносу та корозії [7, 12, 13].

Механічна міцність деталі гарантується за рахунок використання одного матеріалу, а спеціальні властивості поверхня набуває завдяки суцільному або частковому формуванню захисного покриття. У результаті забезпечується підвищена довговічність деталі, вузла, машини [7, 3].

До групи промислово розвинених методів відносять електродугове напилення. Принцип формування такого покриття зводиться до того, що два електроди-дроти постійно подаються у точку їх схрещування де вони розплавляються електричною дугою, яка збуджується між ними. Розплавленні краплі металу диспергуються та прискорюються під тиском потоку стисненого

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

газу і транспортуються до напилюваної поверхні, де з'єднуються з нею за рахунок зварювання, адгезії та механічного зчеплення. На відміну від газополуменевого та плазмового методів напилення електродугове напилення значно дешевше, має більшу продуктивність та технологічність, що дозволяє наносити покриття не тільки в заводських умовах, але і в польових при мінімальних вимогах до комунікаційного забезпечення, крім того, цим методом можливо напилювати як малогабаритні, так і майже необмежені за площею деталі або конструкції.

Такі покриття є одним із засобів зміцнення або відновлення строку служби деталей та вузлів машин, який дає можливість нанесення покриттів з металів та сплавів, що надають поверхні якісно нові прогнозовані функціональні властивості [3, 17, 19].

Уявлення про те, що електродугове напилення може бути застосовано лише в ремонтній практиці для відновлення деталей машин застаріле. Дослідження та досвід вказують на те, що за допомогою цього методу можна вирішувати різноманітні технічні задачі, до яких відносяться напилення зносостійких, антифрикційних та корозійностійких покриттів, відновлення розмірів деталей, усунення напиленням ливарних дефектів, виготовлення прес-форм та інше.

Завдяки створенню в поверхневих шарах матеріалу покриття певного структурно-фазового складу можна цілеспрямовано змоделювати функціональні властивості деталі – отже розширити сферу використання електродугового методу напилення покриттів.

Електродугове напилення покриттів в промисловому масштабі вигідно відрізняється від інших методів газотермічних покриттів за такими показниками, як теплова ефективність, коефіцієнт використання матеріалу, вартість матеріалів, що напилюються, простота у використанні. Витрати електроенергії на 1 кг розпиленого матеріалу при електродуговому напиленні складає приблизно 0,6 кВт/кг, при плазмовому нанесенні цей показник складає 5...7 кВт/кг для порошкового матеріалу та 2...3 кВт/кг для дровового матеріалу. Техніко-економічна оцінка свідчить про те, що електродугове напилення в 3...10 разів

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

дешевше за покриття, отримані іншими газотермічними методами при забезпеченні їхньої високої міцності [12, 13].

Одним із шляхів підвищення якості газотермічних покриттів, у тому числі і електродугових, є підвищення щільності та міцності зчеплення покриттів з основою. Саме низька щільність та міцність зчеплення покриттів з основою стає причиною обмеженого використання електродугових покриттів для зміцнення деталей машин та механізмів, що зазнають значного зовнішнього впливу такого, як, наприклад, абразивний знос або знакозмінні чи ударні навантаження.

Перспективним напрямком підвищення адгезійної та когезійної міцності є застосування додаткового впливу на процеси, які протікають під час формування покриття, так і після нанесення: накладання звукових та ультразвукових коливань, віброобробка, голкофрезерування, електроіскрова обробка та багато іншого. Використання голкофрезерування зарекомендувало себе як перспективний напрямок механічної обробки поверхні при підготовці її до напилення та спосіб прибирання частинок з низькою когезійною міцністю після нанесення покриття. Цей метод використовується для очищення та утворення необхідної шорсткості поверхні – активації напилюваної поверхні. Експериментальні дані вказують на те, що міцність зчеплення при такому виді попередньої обробки поверхні зростає в півтора-два рази [22].

Як зазначено вище, перспективними вважаються методи механічної та хвильової обробки, яким піддають покриття. Проте достатньо малодослідженими залишаються способи нетрадиційного впливу термічної обробки на покриття. Окрім звичного повного відпалу, який проводять з метою зняття термічних напружень, що виникли під час формування покриття, та мимовільного гартування покриття запропоновано новий вид термічної обробки газотермічних покриттів – неповний рекристалізаційний відпал [1]. Такий відпал подібний за режимом до рекристалізаційного, але процес відпалу переривають до того, як почнеться активний ріст зерен, тобто в структурі фіксуються рівноважні кристали, розмір та властивості яких наближено до властивостей

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

наноструктурних матеріалів. При цьому новоутворені рівноважні кристали відіграють роль дисперснозміцнюючої фази [10, 14].

В якості вихідних матеріалів для нанесення покриттів електродуговим методом використовують лише струмопровідні матеріали. Через це процес рекомендовано для виготовлення виробів загальномашинобудівного профілю, тобто, при вирішенні задач, що не вимагають спеціальних неметалевих покриттів, наприклад, керамічних. В цих галузях перспективним є напрямок пошуку нових способів напilenня композиційних електродугових покриттів.

Одним з таких способів вважається та успішно використовується спосіб активованої дугової металізації. За рахунок особливостей модернізованого сопла, використання суміші активованих газів в якості транспортуючого газу, взаємного раціонального розташування сопла та електродів вдалося позбавитися недоліків електродугового напilenня, пов'язаних із підвищенням окисненням покриттів та відносно низьким ККД процесу. В 3...3,5 рази зменшено кут розпилення, збільшено швидкість потоку частинок на 40%, знижено витрати матеріалу.

Покриття, отримані цим способом, демонструють високу твердість, стійкість до тріщиноутворення. Використовуються для створення зносостійких покриттів, відновлення геометрії поверхні відповідальних деталей, що експлуатуються в ударно-абразивних умовах, успішно застосовуються для нанесення антикорозійних покриттів, для захисту від високотемпературної корозії [7, 12, 17].

Одним із шляхів розвитку технології електродугового напilenня покриттів є спосіб нанесення композиційних металополімерних покриттів. Цей метод перебуває в стадії експериментальної розробки. Застосовуються два основних методи – це направлення порошку полімеру в епіцентр плавлення електродів та розпилення дроту, вкритого товстим шаром полімерної композиції [9, 8, 21].

Важливим та рішучим кроком вперед стала модернізація електродугового розпилювача з метою отримання композиційних металокерамічних електродугових покриттів [8, 9].

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

Вищезазначене пояснює постійно зростаючий попит на розробку нових способів отримання захисних покриттів, визначає необхідність їхньої розробки та практичного застосування технологій різноманітного практичного призначення в сучасних умовах [3].

Накопичений практичний досвід вказує на те, що використовуючи газотермічні покриття, як правило, можливо в 2...5 разів зменшити зношування деталей машин, що експлуатуються в найрізноманітніших умовах, крім того, ефективно відновити вже зношені деталі або надати поверхні деталі нових покращених властивостей.

Над цією проблемою працюють багато чисельні науково-дослідницькі інститути та лабораторії, широке коло вчених та виробників [3, 9, 13].

Таким чином, перспективними напрямками розвитку електродугового напилення покриттів є підвищення щільності та міцності зчеплення покриття з основою, зниження ступеня окиснення вихідного матеріалу, розробка методів напилення композиційних металокерамічних, металополімерних та металоскляних покриттів, створення наноструктурних елементів у їх структурі.

### **1.3 Аналіз джерел інформації щодо отримання та застосування композиційних електродугових покриттів**

Використання електродугового методу з метою створення композиційних покриттів знаходиться на стадії розробки та дослідження.

Метод електродугового напилення характеризується високими показниками коефіцієнтами корисної дії і використання матеріалу, який знаходиться у межах 0,7...0,9, має найбільшу продуктивність. Не потребує складного устаткування та являється технологічним методом.

На даний час метод нанесення композиційних електродугових покриттів знаходиться на стадії експериментальної розробки для металополімерних покриттів [8, 9]: у вигляді нанесення порошкового полімеру або розпилення дроту, вкритого полімером, значна частина якого і в тому, і в іншому випадках вигорює, тобто деструктує, в процесі нанесення. Хоча отримане покриття має

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

високі антикорозійні та антифрикційні властивості, його виробництво не є доцільним через токсичність парів полімеру, що руйнується під дією тепла горіння дуги, та незначний вміст полімеру в готовому покритті з тієї ж причини, що обмежує можливості даного методу.

Можливе нанесення порошкових дротів [8], але виробництво таких матеріалів не набуло масового розповсюдження через високу вартість та складність технології виготовлення подібного матеріалу для напилення. Крім того, електродугові покриття, отримані з такого виду розпалюваного матеріалу, характеризуються низькими механічними властивостями.

Нанесення композиційних металополімерних, металокерамічних та металоскляних покриттів стало можливим завдяки модернізації електродугового розпилювача, яка полягала у розробці інжекційного вузла створеного для подачі металевих, полімерних, керамічних та скляних порошків.

Саме завдяки цьому з'явилася можливість отримання багатокомпонентних покриттів методом електродугового напилення, що залишається актуальною та економічно доцільною задачею.

Завдяки розробленому вузлу подавання порошкового матеріалу в електродуговий розпилювач отримано можливість виготовлення композиційних покриттів, що значно розширює можливості даного методу. На даний час ця можливість досліджується та вважається перспективною, оскільки веде до значного скорочення витрат при отриманні багатокомпонентних композиційних покриттів на основі металів та їх сплавів [8, 9].

На теперішній час ця технологія знаходиться на завершальній стадії розробки, проте вже існуючих публікації достатньо для того, щоб спрогнозувати широке промислове застосування методу.

#### **1.4 Аналіз джерел інформації щодо отримання наноструктурних елементів у структурі електродугового покриття**

Більшість фізичних властивостей кристалічного матеріалу характеризується екстремальною поведінкою при досягненні певного критичного розміру зерна. Це

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |





## 1.5 Вибір обладнання для отримання покриттів електродуговим методом

Електродугове напилення (ЕДН) знаходить саме широке застосування і поступово витісняє традиційний газополуменевий метод. Це пов'язано з більш високою продуктивністю електродугового методу (в 3...4 рази вище, ніж при газополуменовому напиленні), розповсюдженістю і доступністю джерела енергії для плавлення металу, отриманням більш якісних покриттів з дещо більшою міцністю зчеплення з основним металом, можливістю механізації та автоматизації процесу.

Якість покриття, що наноситься, продуктивність процесу значною мірою залежать від технічних характеристик застосовуваного обладнання. На даний час в експлуатації знаходиться широка номенклатура установок для електродугового напилення різних фірм.

Аналіз науково-технічних джерел і практичних досліджень за останнє десятиліття показав, що розвиток обладнання для електродугового напилення полягає у розширенні технологічних можливостей і збільшенні ресурсу роботи, підвищення продуктивності та зручності експлуатації, скорочення втрат напилюваного матеріалу і підвищення якості покриттів. При цьому основні зусилля спрямовані на вирішення завдання управління параметрами гетерофазного потоку: швидкістю і температурою газу і частинок, коефіцієнтом зосередженості струменя, гранулометричним складом частинок.

Провідні фірми в області розробки і виробництва обладнання для газотермічного напилення створюють модульні системи установок для ЕДН, великою перевагою яких є сумісність окремих вузлів, таких як електрометалізатори, пакети шлангів і т.д., з усіма джерелами живлення та спеціальним оснащенням, що входять до системи.

Найкращими показниками серед вітчизняних виробників володіє обладнання, що розробляється Фізико-механічним інститутом НАН України (м. Львів) спільно з ГМП «Газотермік» при ФМІ НАН України.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

Шляхом вдосконалення конструкції обладнання для електродугового напилення та підвищення захисно-енергетичного рівня факелу розпилю була вирішена задача підвищення фізико-механічних властивостей покриттів за рахунок зниження окиснення диспергованого металу у гетерофазному струмені і підвищення швидкості польоту частинок. Устаткування для електродугового напилення монтується на супорті токарно-гвинторізного верстата 16K20 і складається з приводного механізму і механізму подачі та системи розпилення.

Установки для електродугового напилення, вироблені НПООО «МАД» (м. Мінськ) поєднують у собі переваги електродугового і високошвидкісного напилення. В основі роботи установок лежить процес плавлення дротів електричною дугою і диспергування розплавленого металу високошвидкісним струменем продуктів згоряння пропано-повітряної суміші. В апаратах використовуються відновні транспортуючі гази з оригінальною подачею через профільовані сопла, також установки характеризуються особливим взаємним розташуванням токопідводів і розпилюючого сопла. Швидкісний напір потоку, що виражається відношенням кінетичної енергії до одиниці об'єму газу та характеризує силу, що діє на частинку в потоці, становить 234 кПа у порівнянні з 75 кПа при традиційному електродуговому напиленні. При цьому частки розплавленого металу розганяються у потоці до швидкості 500 м/с і формують покриття, яке має міцність зчеплення вдвічі вище, ніж при традиційному електродуговому напиленні. Продукти згоряння утворюють на виході з сопла надзвуковий струмінь зі швидкістю понад 1500 м/с при 2200 К. Оригінальна конструкція камери згоряння, використання ефективного каталізатора горіння, відсутність водяного охолодження камери і наявність пристрою автоматичного підпалу суміші істотно підвищує надійність обладнання і полегшує роботу персоналу. Недоліком даного обладнання є підвищена собівартість покриттів через використання дорогих газів з високими їх витратами.

Для нанесення покриттів використовуються апарати з різною системою подачі стисненого газу та геометрією сопла. На даний час відомо кілька схем формування гетерофазного металоповітряного потоку при електродуговому

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

напиленні: діафрагмова, центрально-соплова, диференціальна і закрита. У серійному виробництві найширше застосування отримала діафрагмова схема. Зокрема вона використовується при виготовленні установок для ЕДН Барнаульського апарат-механічного заводу і фірм "Metco" і "Mogul" у США. При використанні цієї схеми формується досить широкий металоповітряний потік, що є ефективним для нанесення антикорозійних покриттів.

Центрально-соплова схема використовується у металізаторі ЕМ-17 (м. Барнаул, Росія), у якому створюється вузький металоповітряний потік, який є особливо ефективним при нанесенні покриттів на тіла обертання, наприклад, на вали, у тому числі і колінчасті.

З метою підвищення якості покриттів доцільно використовувати розпилюючу голівку для металізатора, в основу якої покладена закрита схема формування металоповітряного потоку. У роботі відзначається перевага апаратів із закритою схемою і диференціальним соплом у порівнянні з відкритою схемою центрального сопла. Закрита схема формування металоповітряного потоку дозволяє отримувати надзвичайно дрібні фракції напилюваних частинок, які визначаються високою швидкістю польоту (50...130 м/с). Закрита схема використовується в апаратах виробництва ДМП "Газотермік" при ФМІ НАН України. Вона має свої переваги у тому випадку, коли розмір дуги у перетині стає порівняним з перетином циліндрового каналу, в якому вона горить. Закрита схема формування металоповітряного потоку дозволяє реалізовувати два режими напилення: безперервний та імпульсний. При зменшенні діаметра циліндричної частини сопла тиск в ньому може стати рівним тиску у дуговому проміжку. При такому співвідношенні тисків холодне повітря активно проникає до зони горіння дуги і зумовлює зменшення її довжини. Коли довжина скоротиться настільки, що розплав замкне дуговий проміжок, виникає імпульсний режим. Співвідношення тисків у дузі сильно залежить від діаметра сопла і потужності дуги. Експериментально встановлено, що чим більший діаметр сопла, тим більшою повинна бути потужність дуги, щоб реалізувався імпульсний режим роботи апарату.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

При роботі апарату для ЕДН в імпульсному режимі, торці дротів, які плавляться, стають паралельними між собою. Рідка фаза, замикаючи торці електродів-дротів, реалізує рейкотронний ефект, який полягає у тому, що у щілині між двома паралельними електродами діє електродинамічна сила, яка спрямована паралельно до поверхонь електродів. Розплав викидається електродинамічними силами з проміжку і виникає пауза, після якої цикл повторюється. Частота викидів залежить від швидкості подачі дротів-електродів. Чим вище швидкість подачі дроту, тим вище частота викиду розплаву. При такому способі ЕДН за рахунок рейкотронного ефекту порції рідкого металу отримують додатковий імпульс, який підвищує швидкість польоту в початковий момент і сприяє диспергуванню розплаву. Одним з таких апаратів є ЕМ-14, що входить до комплексу установки для електродугового напилення КДМ-2. Саме її й обрали для нанесення покриттів у даній роботі. Технічна характеристика установки КДМ-2 наведена у табл. 1.1.

Комплект КДМ-2 включає в себе джерело живлення ТІМЕЗ-500 з установленим на ньому пультом керування та касетним блоком. Комплект можна використовувати для ручної та механізованої металізації. Будова пульту керування забезпечує контроль витрат і тиску стисненого повітря, очищення повітря від вологи та жиру, блокування електричної схеми комплексу за мінімально припустимими витратами повітря, контроль електричних параметрів дуги.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

**Таблиця 1.1 – Технічна характеристика установки для электродугового  
нанесення покриттів КДМ-2**

| Номінальна продуктивність розпилення матеріалу, кг/год: |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| Алюмінію                                                | 12,5      |
| Цинку                                                   | 32        |
| Сталі                                                   | 10        |
| Молібдену                                               | 8         |
| Коефіцієнт використання матеріалу:                      |           |
| Алюмінію ( $U=23$ В)                                    | 0,75      |
| Цинку ( $U=17$ В)                                       | 0,75      |
| Діаметр розпилюваного дроту, мм                         | 1,2...2,0 |
| Швидкість постачання дроту, м/хв                        | 2...12    |
| Робочий тиск стиснутого повітря, МПа                    | 0,5...0,6 |
| Витрати стиснутого повітря, м <sup>3</sup> /год         | до 90     |
| Споживча потужність, кВт                                | до 25     |
| Робоча напруга дуги, В                                  | 17...44   |
| Робочий струм, А                                        | до 400    |

Таким чином, електродуговий метод характеризується найвищою продуктивністю, низькою вартістю та простотою обладнання. Для нанесення покриттів обрали установку електродугового нанесення покриттів КДМ-2 у комплект якої входить електродуговий металізатор ЕМ-14 із закритою схемою формування металоповітряного потоку.

### **1.6 Постановка задачі дипломної роботи**

Виходячи з проведеного аналізу науково-технічної літератури стосовно сучасного стану та шляхів розвитку електродугового методу нанесення покриттів встановлено, що перспективним напрямом підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей сталевих покриттів є забезпечення високих енергетичних параметрів напилюваних частинок та зменшення їх розмірів і

|     |       |             |        |      |                                                          |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|----------------------------------------------------------|------|
|     |       |             |        |      | <div align="center"> <b>КР.131.5121з.01.00.ПЗ</b> </div> | Лист |
|     |       |             |        |      |                                                          |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                                                          |      |

ступеня окиснення. Для вирішення цієї проблеми потрібно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати стан, перспективи розвитку та застосування електродугових покриттів;
2. Дослідити вплив конструктивних та технологічних параметрів на процес формування електродугових покриттів;
3. Модернізувати електродуговий розпилювач щодо збільшення енергетичних параметрів напилюваних частинок та зменшення їх розмірів і ступеня окиснення;
4. Дослідити мікроструктуру та властивості сталевих електродугових покриттів;
5. Підвищити коефіцієнт використання матеріалу та якість електродугового сталевих покриття;
6. Розробити технологічні рекомендації щодо процесу напилення сталевих електродугових покриттів модернізованим розпилювачем;
7. Розглянути питання охорони праці і охорони навколишнього середовища з урахуванням розроблених технологічних рекомендацій щодо нанесення електродугових покриттів модернізованим розпилювачем;
8. Розрахувати економічну ефективність даної розробки.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

## 2 МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РОЗПИЛЮВАЧА ЩОДО ОТРИМАННЯ СТАЛЕВИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

### 2.1 Дослідження впливу конструкційних та технологічних параметрів на процес формування сталевих електродугових покриттів

На практиці для створення електродугових покриттів широко використовують комплект для електродугового напилення КДМ-2, створений на базі моделі КДМ-1. До складу КДМ-2 входять: електродуговий розпилювач ЕМ-14М, джерело струму ТИМЕЗ-500, переносна стійка для котушок із дротом, пульт керування, повітряний фільтр і засоби індивідуального захисту [2].

Електродуговий розпилювач ЕМ-14М використовують для створення металевих покриттів із дротів діаметром 1,0...3,5 мм і температурою плавлення не більше 3000 °С. Швидкість подачі дротів складає 2...14 м/год.

Найбільший вплив на процес розпилення має форма та розміри сопла. В електродуговому металізаційному апараті “ЕМ-14М” в якості основного сопла застосовують циліндричне керамічне сопло з діаметром отвору 6 мм. Для створення ефективного потоку, що розпилює рідкий метал, такі сопла вимагають великої витрати стиснутого газу 60...90 м<sup>3</sup>/год [2].

Конструкційні параметри мають забезпечувати максимальне використання підвідної енергії, можливість регулювання ентальпії напилюваних частинок. Найбільш відповідальними параметрами є конструктивні особливості і розміри соплового пристрою. Не зважаючи на суттєву відмінність соплових пристроїв у них необхідно, в першу чергу, враховувати діаметр та довжину сопла, а також його профілювання.

Вказані параметри визначають, головним чином, швидкість потоку розпилювального газу і, відповідно, швидкість напилюваних частинок. Конструктивні параметри значно впливають на тепловий коефіцієнт корисної дії

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

До технологічних факторів відносяться параметри напилюваних матеріалів (матеріалів електродів і порошку), потужність електричної дуги та витрати транспортуючого газу [1, 11]. Оскільки ключове значення має якість проплавлення матеріалу матриці (металевих електродів) доцільно прийняти технологічні параметри, застосовувані при звичайній електродуговій металізації.

Параметри, що характеризують зовнішні умови нанесення не відрізняються від інших методів ГТН. Кут зустрічі потоку з поверхнею  $65\ldots 90^\circ$ , мінімальний кут  $45^\circ$ . При наближенні кута до  $90^\circ$  зменшується поруватість, збільшується міцність зчеплення покриття з поверхнею.

Також якість покриття характеризується параметрами потоку транспортуючого газу (повітря) з розігрітими частками. Крім диспергування крапель металу та їх змішування з порошком відбувається окиснення, незначне нітрування металевої складової матеріалу [1, 2].

|     |       |             |        |      |                                                                                                                          |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|     |       |             |        |      | <div style="text-align: center; font-size: 24px; font-weight: bold;">             КР.131.5121з.01.00.ПЗ           </div> | Лист |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                                                                                                                          |      |

## 2.2 Розрахунок оптимального режиму електродугового напилення покриття

Для отримання якісного електродугового сталевого покриття, а також модернізації електродугового розпилювача ЕМ-14М, яка дозволить збільшити коефіцієнт використання матеріалу, щільність, міцність зчеплення покриття з основою, необхідно розрахувати оптимальні технологічні параметри режиму його напилення.

### 2.2.1 Розрахунок швидкості витікання повітря з сопла електродугового розпилювача ЕМ-14М

В основі розрахунків витікання стиснутого повітря з сопла в атмосферу лежить відоме рівняння Бернуллі руху ідеального газу:

$$\gamma z + p + \frac{\rho v^2}{2} = const \quad (2.1)$$

Складові рівняння виражаються в одиницях тиску, тому їх часто називають "тисками":  $z$  – ваговий тиск;  $p$  – статичний тиск;  $v$  – швидкісний або динамічний тиск.

На практиці часто ваговим тиском нехтують, і рівняння Бернуллі приймає наступний вигляд:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = const \quad (2.2)$$

Суму статичного і динамічного тисків називають повним тиском  $P_0$ . Таким чином, отримаємо:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = P_0 \quad (2.3)$$

Швидкість витікання газу можна визначати за формулою:

$$v = \sqrt{2gH} = \sqrt{2g \frac{P_0 - p}{\rho_0}} \quad (2.4)$$

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

Відношення  $p/p_0$  називається ступенем розширення газу. Аналіз формули показує, що вираз, що стоїть під коренем у квадратних дужках, дорівнює нулю при  $p/p_0 = 1$  і  $p/p_0 = 0$ .

Відношення тисків  $p/p_0$ , при якому масові витрати досягають максимального значення, називається критичним. Можна показати, що критичне відношення тисків дорівнює:

$$\left(\frac{p}{P_0}\right)_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (2.5)$$

При досягненні тиском  $p$  критичного значення витрати стають максимальними, а швидкість витікання досягає критичного значення, рівного місцевій швидкості звуку. Швидкість звуку визначається відомою формулою:

$$v_{зв} = \sqrt{k \frac{p}{\rho}} = \sqrt{kRT}. \quad (2.6)$$

Остаточно швидкість у підкритичній зоні, для електродугового апарату, з урахуванням стиснення струменя визначаються за формулами:

$$v = \varphi \sqrt{\frac{2}{k-1} \frac{P_0}{\rho_0} \left[ 1 - \left(\frac{p}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (2.7)$$

$k$  – показник адіабати (для повітря  $k = 1,4$ ), методика розрахунку коефіцієнту швидкості  $\varphi$  описана у ГОСТі 8.563.1-97.

Після спрощення рівняння для знаходження швидкості повітря на початковій ділянці буде мати вигляд:

$$\omega_{озв} = 1,08 \cdot \sqrt{RT}. \quad (2.8)$$

Для практичних розрахунків закономірностей розвитку прямооточних струменів необхідно знати закони зміни максимальної швидкості по довжині струменя. Затухання швидкості по осі основної ділянки струменя для повітря можна виразити формулою:

$$v_{\text{повіт}} = w_{\text{дозк}} \cdot \left( \frac{0,96}{\frac{\alpha L}{R_0} + 0,29} \right), \quad (2.9)$$

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

де  $\alpha$  – коефіцієнт турбулентності повітряного струменя;  $L$  відстань від зрізу повітряного сопла до даної точки струменя, м;  $R_0$  – радіус повітряного сопла, м.

Для знаходження коефіцієнт турбулентності повітряного струменя використовуємо формулу:

$$\alpha = \left(0,4 \frac{d_{\text{др}}}{D_0}\right)^{2,56} + a_1, \quad (2.10)$$

де  $d_{\text{др}}$  – діаметр дроту, м;  $D_0$  – діаметр повітряного сопла, м;  $a_1$  – коефіцієнт турбулентності для даного сопла (для сопел діаметром  $6 \cdot 10^{-3}$  м  $a_1 = 0,056$ ).

Дані для розрахунку наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.2 – Параметри для розрахунку швидкості стисненого повітря

| Позначення параметрів                                     | Значення |
|-----------------------------------------------------------|----------|
| Діаметр сопла – $D_0$ , м                                 | 0,006    |
| Радіус сопла – $R_0$ , м                                  | 0,003    |
| Питома газова стала – $R$ , Дж·К/кг                       | 287      |
| Діаметр дроту – $d_{\text{др}}$ , м                       | 0,0012   |
| Коефіцієнт турбулентності для сопла – $a_1$               | 0,056    |
| Температура – $T$ , К                                     | 293      |
| Швидкість повітря на початковій ділянці – $\omega$ м/с    | 313,1832 |
| Коефіцієнт турбулентності повітряного струменя – $\alpha$ | 0,057595 |
| Довжина початкової ділянки струменя – $L$ , м             | 0,034899 |

За результатами побудовано графік залежності швидкості повітря від відстані від зрізу сопла до напилюваної поверхні (рисунок 2.10).

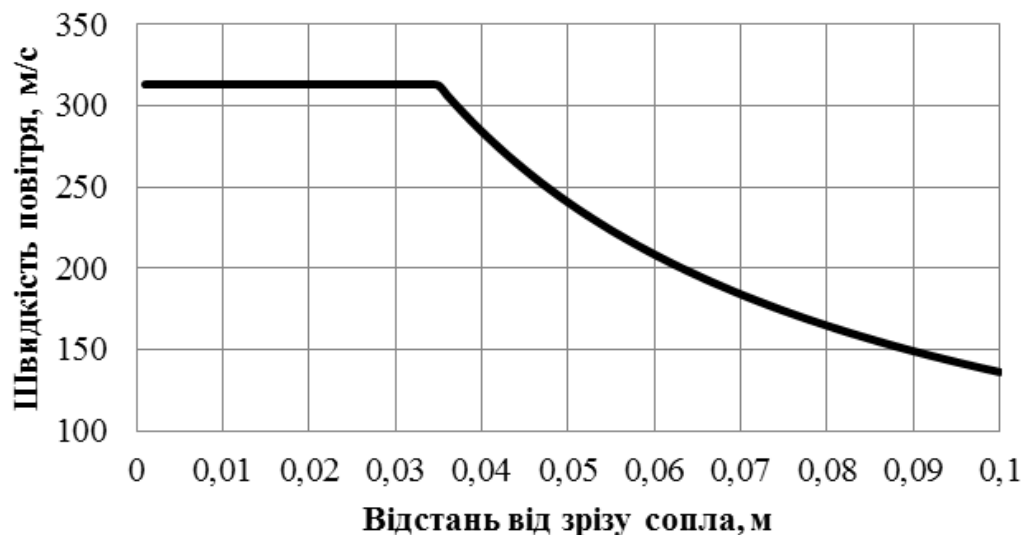


Рисунок 2.10 – Залежність швидкості стисненого повітря від відстані від зрізу сопла розпилювача до напилюваної поверхні

Таким чином з наведеного графіка видно, що швидкість повітря на початковій ділянці струменя є постійною та складає близько 310 м/с. На дистанції приблизно 35 мм закінчується дана ділянка та швидкість повітря починає знижуватися і на дистанції 100 мм складає 145 м/с.

### 2.2.2 Розрахунок швидкості частинок

По мірі віддалення від сопла осьова швидкість частинок змінюється, оскільки приймає значення від початкового значення до нуля. Причиною зменшення швидкості частинок, вочевидь, являється опір повітря. Осьова швидкість частинок переважає над всіма іншими компонентами (що підтверджується кутами розпилу струменя, які не перевищують  $12^\circ$ ), переміщення частинок вздовж осі під дією сили опору повітря можна уявити, як рівнозаміdlений рух тіла. Коли частинка пройде початкову ділянку та вийде за його межі, її осьова швидкість може бути розрахована за формулами:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_0 = 0,67 R_0 / a; [26] \\ \tau = S_0 / w_{\text{дозк}}; \\ v_{\text{чп}} = w_{\text{дозк}} - \frac{1}{\frac{6 \cdot C_x \cdot \gamma_{\text{повіт}} \cdot \tau}{4 \cdot d \cdot \gamma_{\text{м}}} + \frac{1}{w_{\text{дозк}}}}; \\ v_{\text{ч}} = v_{\text{чп}} \left( 1 - \frac{3 C_x \gamma_{\text{повіт}} L}{4 R_a \gamma_{\text{м}}} \right)^{1/2}, [27] \end{array} \right. \quad (2.11)$$

де  $S_0$  – відстань від зрізу сопла до кінця початкової ділянки, м;  $\tau$  – час перебування частинки на початковій ділянці, с;  $v_{\text{чп}}$  – швидкість часток металу в межах початкової ділянки струменя, м/с;  $C_x$  – коефіцієнт лобового опору частинки;  $\gamma_{\text{повіт}}$  – щільність повітря в кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – діаметр частинок в м;  $\gamma_{\text{м}}$  – щільність металу в кг/м<sup>3</sup>;  $v_{\text{ч}}$  – осьова швидкість частинок за межами початкової ділянки;  $R_a$  – радіус кулястої частинки, м;  $L$  – відстань до даної точки, м.

Дані для розрахунку наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.3 – Параметри для розрахунку швидкості частинок

| Позначення параметрів                                                | Значення |
|----------------------------------------------------------------------|----------|
| Густина повітря – $\gamma_{\text{пов}}$ , кг/м <sup>3</sup>          | 1,27     |
| Густина матеріалу частинки – $\gamma_{\text{м}}$ , кг/м <sup>3</sup> | 7900     |
| Коефіцієнт лобового опору частинки – $C_x$                           | 0,5      |
| Діаметр частинок – $d$ , м                                           | 0,00006  |
| Час перебування частинки на початковій ділянці, с                    | 0,00066  |
| Радіус частинки – $R_0$ , м                                          | 0,000027 |

За отриманими результатами розрахунку побудований графік залежності швидкості частинок від відстані від зрізу сопла до дистанції напilenня (рисунок 2.11).

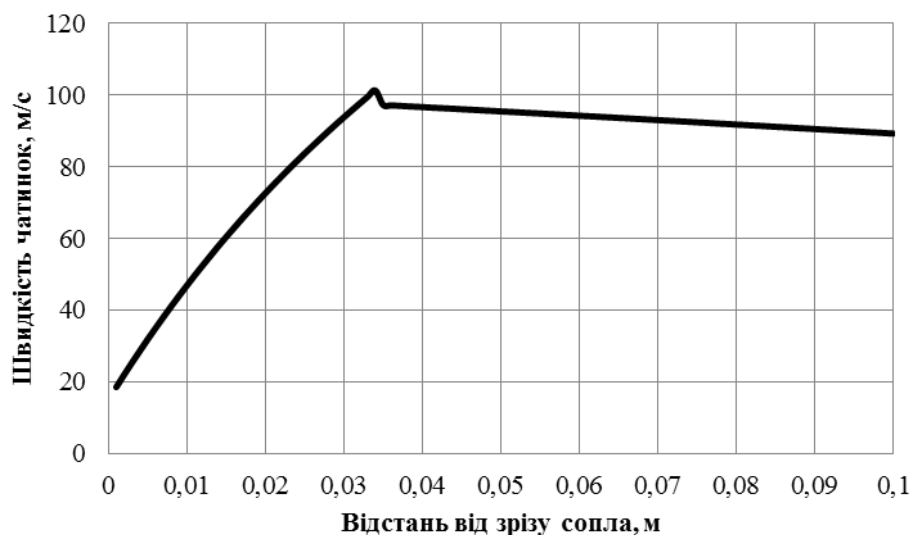


Рисунок 2.11 – Залежність швидкості частинок напилюваного матеріалу від зрізу сопла до напилюваної поверхні

З рисунку 2.11 видно, що на початковій ділянці струменя металеві частинки прискорюються та їх швидкість зростає до величини близько 100 м/с. При проходженні початкової ділянки струменя, яка складає 30 мм, швидкість частинок починає поступово падати та на дистанції 100 мм від зрізу сопла складає 89,3 м/с.

### 2.2.3 Розрахунок швидкості частинок та повітря у поперечному перерізі

Подібність полів швидкостей у всіх поперечних перерізах основної ділянки турбулентних струменів будь-якої форми, що рухаються у необмеженому просторі. Профіль швидкості для повітря та частинок може бути виражений формулами:

$$\begin{cases} v_{\text{повіт}_y} = v_{\text{повіт}_L} \left[ 1 - \left( \frac{y}{L} \right)^{3/2} \right]^2; \\ v_{\text{ч}_y} = v_{\text{ч}_L} \left[ 1 - \left( \frac{y}{L} \right)^{3/2} \right]^2, \end{cases} \quad [29] \quad (2.12)$$

де  $v_{\text{повіт}_y}$  – швидкість повітря в поперечному перерізі факела в м/сек;

$v_{\text{повіт}_L}$  – осьова швидкість повітря на відстані  $L$  від зрізу сопла, м;  $y$  – радіус

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

струменя, що розширився, м;  $L$  – відстань до даної точки, м;  $v_{qy}$  – швидкість частинок у поперечному перерізі факела в м/с;  $v_{qL}$  – швидкість частинок на відстані  $L$  від зрізу сопла, м/с.

Дані для розрахунку наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.4 – Швидкість частинок та повітря у поперечному перерізі

| Відстань від зрізу сопла, м | Відстань від осі потоку, м | Швидкість частинок на осі, м/с | Швидкість частинок на відстані від осі, м/с |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|
| 0,1                         | 0,002                      | 89,3                           | 88,80                                       |
|                             | 0,004                      |                                | 87,88                                       |
|                             | 0,006                      |                                | 86,69                                       |
|                             | 0,008                      |                                | 85,30                                       |
|                             | 0,01                       |                                | 83,74                                       |
|                             | 0,012                      |                                | 82,03                                       |
|                             | 0,014                      |                                | 80,19                                       |
|                             | 0,016                      |                                | 78,24                                       |
|                             | 0,018                      |                                | 76,18                                       |
|                             | 0,02                       |                                | 74,04                                       |
|                             | 0,022                      |                                | 71,82                                       |
|                             | 0,024                      |                                | 69,54                                       |
|                             | 0,026                      |                                | 67,19                                       |
|                             | 0,028                      |                                | 64,80                                       |
|                             | 0,03                       |                                | 62,36                                       |

За результатами розрахунку був побудований графік на відстані від зрізу сопла 100 мм (рисунок 2.12).

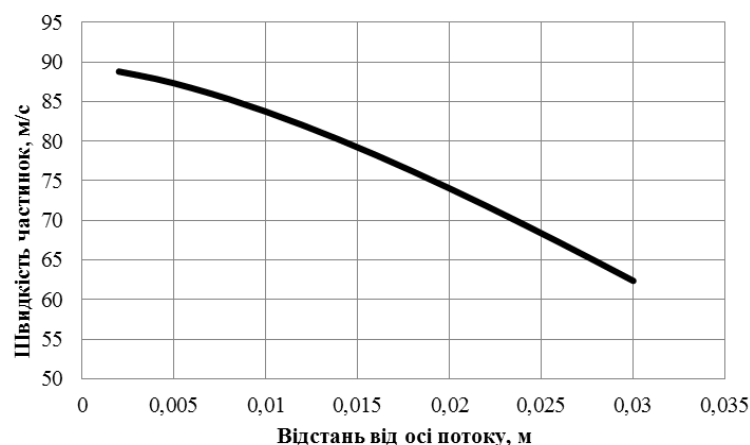


Рисунок 2.12 – Залежність швидкості частинок від відстані від осі потоку на дистанції напилання 100 мм

З рисунку 2.12 видно, що на дистанції напилання 100 мм по осі потоку частинки рухаються зі швидкістю 88 м/с, а на відстані від осі потоку 30 мм їх швидкість падає до 62 м/с.

## 2.2.4 Розрахунок температури повітря

Поля температур газу  $T$  пропорційні зміні швидкостей. Після проходження електричної дуги температура нагрівання стисненого повітря у роботах [Ошибка! Источник ссылки не найден.] дорівнює 2100 К.

По осі X:

$$\frac{\Delta T_{ex}}{\Delta T_{eo}} = 0,86 \frac{V_{ex}}{V_{eo}}, \quad (2.13)$$

де  $\Delta T_{ex}$  – зміна температури повітря вздовж осі факела, К;

$\Delta T_{eo}$  – температури повітря після проходження електричної дуги, К;

$V_{ex}$  – швидкість повітря вздовж осі, м/с;

$V_{eo}$  – швидкість повітря на початковій ділянці, м/с.

За отриманими розрахунковими даним було побудовано графік залежності температури від відстані од сопла металізатора (рисунок 2.13)

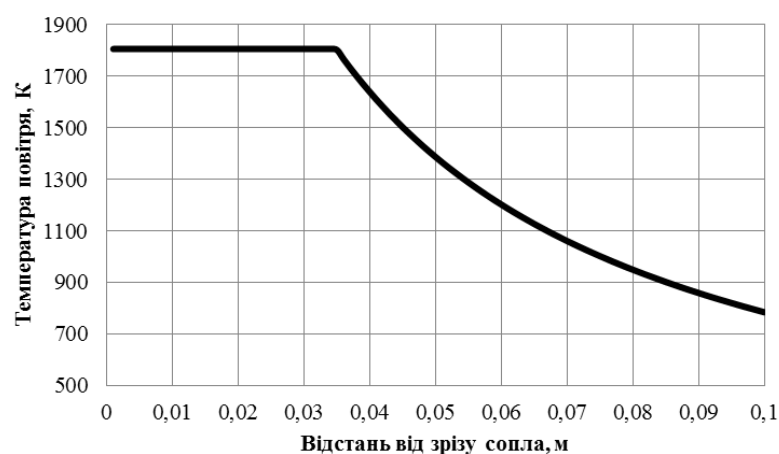


Рисунок 2.13 – Залежність температури повітря від відстані від зрізу сопла до напилуваної поверхні

З рисунку 2.13 видно, що зміна температури повітря дійсно пропорційна зміні його швидкості. На початковій ділянці струменя температура є постійною,

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

при віддаленні від неї температура починає падати та на дистанції напилення складає близько 800 К.

### 2.2.5 Вибір оптимальних технологічних параметрів напилення електродугових сталевих покриттів

Нанесення покриття можливо здійснювати за паспортом установки КДМ-2 на наступних режимах: сила струму – 60...450 А; напруга – 17...44 В; тиск стиснутого повітря – 0,4...0,6 МПа; діаметр сопла – 6 мм; відстань від зрізу сопла до напилюваної поверхні – 90...120 мм.

На основі цих даних і отриманих у результаті розрахунку обрано власний режим напилювання: сила струму – 110 А; напруга – 25 В; тиск стиснутого повітря – 0,6 МПа; діаметр основного сопла – 6 мм; відстань від зрізу додаткового сопла до підкладки – 100 мм.

Найбільш важливими параметрами режиму роботи є потужність дуги і витрати розпалюваного газу. Потужність електричної дуги залежить від значень струму і напруги. Необхідну потужність встановлюють за значеннями струму.

Розрахуємо потужність електричної дуги:

$$P = U \times I, \quad (2.14)$$

де  $P$  – потужність дуги, кВт;  $U$  – напруга, В;  $I$  – сила струму, А.

$$P = 25 \times 110 = 2750 \text{ Вт} = 2,75 \text{ кВт}.$$

Тиск стиснутого повітря дорівнює 0,6 МПа, при цьому витрати матеріалу складають 13 кг/год. Як розпилюючий газ використовуємо стиснене повітря.

Також з найважливіших параметрів є діаметр електродного дроту  $d_d$  (обрано  $d_d = 1,2 \text{ мм}$ ) і швидкість його подачі. Середня швидкість плавлення електродів  $w_p$  пов'язана зі швидкістю їх подачі  $V$  наступною залежністю:

$$V = w_p / \cos \varphi, \quad (2.15)$$

Розрахуємо швидкість подачі дроту:

$$V = 0,15 \times 0,5 = 0,07 \text{ м/с}.$$

Таким чином маємо такі оптимальні технологічні параметри напилювання:

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

- Сила струму  $I = 110 \text{ А}$ .
- Напруга  $U = 25 \text{ В}$ .
- Потужність електричної дуги  $P = 2,75 \text{ кВт}$ .
- Тиск розпилювального газу  $0,6 \text{ МПа}$ .
- Витрати газу  $12,5 \text{ кг/год}$ .
- Діаметр електродного дроту  $d_d = 1,2 \text{ мм}$ .
- Швидкість подачі дроту  $V = 0,07 \text{ м/с}$ .
- Дистанція напилювання  $L = 80 \text{ мм}$ .

Ці параметри забезпечують максимальну швидкість частинок ( $100 \text{ м/с}$  на початковій ділянці струменю, та  $93,7 \text{ м/с}$  на дистанції  $75 \text{ мм}$ ) при напиленні, що дозволяє отримати високі показники деформації частинок  $70...80 \%$  та низьку пористість покриття  $5...7 \%$ .

### **2.3 Модернізація електродугового розпилювача щодо отримання сталевих електродугових покриттів з підвищеними фізико-механічними властивостями**

В основу модернізації електродугового розпилювача ЕМ-14М поставлено задачу вирішення якої дозволить збільшити коефіцієнт використання матеріалу при напиленні сталевих електродугових покриттів і підвищити його якість, тобто збільшити щільність, міцність зчеплення покриття з основою, знизити його пористість.

Поставлена задача вирішується тим, що замість штатного ковпака розпилюючої голівки встановлюються модернізований (рис. 2.1).

Модернізований ковпак має основне робоче бронзове сопло 5 з кільцевою камерою і транспортувальними соплами для подачі горючого газу, виходи яких розміщені під гострим кутом до осі високотемпературного струменя і направлені у бік напилюваної поверхні. Отвір основного робочого сопла, з якого відбувається витікання робочого стисненого газу (повітря), має менший діаметр, ніж отвір, з якого виходять транспортувальні сопла для подачі горючого газу. Подача горючого газу здійснюється за допомогою інжекції. Сопло 5 встановлено

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

в ізолятори, які виготовлені із фторопласту і притиснуте захисним екраном 1 до ковпака 2. Захисний екран 1 також містить кільцеву камеру з соплами, виходи яких розміщені під гострим кутом до осі струменя і направлені у бік напилюваної поверхні, через які подається стиснутий газ.

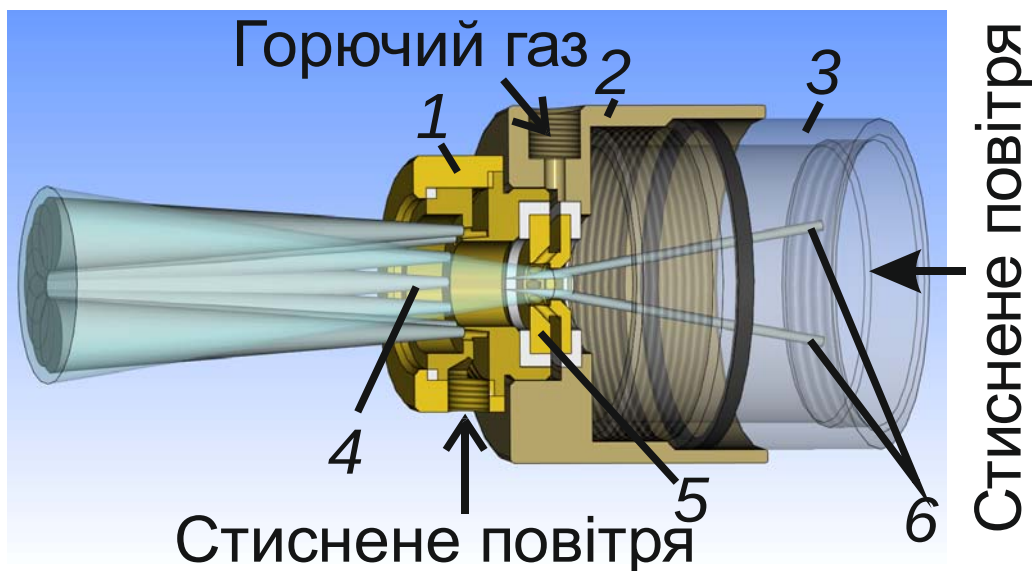


Рисунок 2.1 – Модернізований ковпак електродугового розпилювача ЄМ-14М:

1 – захисний екран; 2 – ковпак розпилюючої голівки; 3 – перехідник; 4 – високотемпературний струмінь; 5 – основне бронзове сопло; 6 – дроти-електроди

Пристрій для електродугового напилення сталевих покриттів працює у такий спосіб. У ковпак розпилюючої голівки 2 подається робочий стиснений газ, який витікає в навколишню атмосферу через основне робоче сопло 5. В кільцеву камеру захисного екрану 1 також подається стиснений газ, який витікає в навколишню атмосферу через сопла, виходи яких розміщені під гострим кутом до осі струменя і направлені у бік напилюваної поверхні. При подачі дротів-електродів 6 між ними збуджується електрична дуга, яка розплавляє їх торці. Точка схрещування дротів-електродів, відносно основного робочого сопла 5, регулюється за допомогою перехідника 3. Робочий стиснений газ зриває каплі рідкого металу, диспергує їх і прискорює. Таким чином формується двофазний потік направлений в сторону напилюваної поверхні. За рахунок подачі стисненого газу з сопл захисного екрану створюється розрядження, яке

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

Одним із основних недоліків електродугового методу напилення являється значне окиснення розпилюючого матеріалу, так як у традиційній технології розпилення відбувається стиснення повітрям. Для зменшення ступеня окиснення у модернізований ковпак подається горючий газ (пропан), що приводить до підвищення адгезійної та когезійної міцності покриття.

1 Модернізація електродугового розпилювача ЕМ-14М дозволила підвищити коефіцієнт використання матеріалу при напиленні та фізико-механічні властивості покриттів за рахунок збільшення швидкості розплавлених частинок і зменшення їх ступеня окиснення.

|     |       |             |        |      |                                                                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------------------------------------------------------|------|
|     |       |             |        |      | <div style="text-align: center;"> <b>КР.131.5121з.01.00.ПЗ</b> </div> | Лист |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                                                                       |      |

### 3 АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ ОТРИМАНИХ МОДЕРНІЗОВАНИМ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ РОЗПИЛЮВАЧЕМ ЕМ-14М

#### 3.1 Використані матеріали та обладнання для формування електродугових покриттів

Для зміцнення та відновлення зношених поверхонь тертя електродуговим методом напилення наносять покриття зі сталі, бронзи, псевдосплавів та інших матеріалів.

При відновленні геометричних розмірів сталевих валів найчастіше напилюють електродуговим методом конструкційну ресорно-пружинну сталь марки 65Г тому, що після напилення отримане покриття володіє хорошою відносно міцністю зчеплення з основою, має високу твердість та зносостійкість. Цей матеріал розповсюджений і має низьку собівартість.

Тому в якості розпилюючого матеріалу було обрано сталевий дріт діаметром 1,2 мм марки 65Г, хімічних склад якого наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі 65Г

| Хімічний елемент | C         | Si        | Mn      | Ni      | S        | P        | Cr      | Cu     | Fe |
|------------------|-----------|-----------|---------|---------|----------|----------|---------|--------|----|
| Вміст, %         | 0,62-0,70 | 0,17-0,37 | 0,9-1,2 | до 0,25 | до 0,035 | до 0,035 | до 0,25 | до 0,2 | 97 |

Для підготовки поверхні зразків використовували установку струменево-абразивної обробки марки 026-7 «Ремдеталь». В якості абразиву використовували електрокорунд марки 7Б, шліф зерно номер 125 по ОСТ 5.9957 – 85. Очищення стисненого повітря для струменево-абразивної обробки та напилення проводили шляхом пропускання через вологомасловідділювач у відповідності до ОСТ 5.9829-81.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

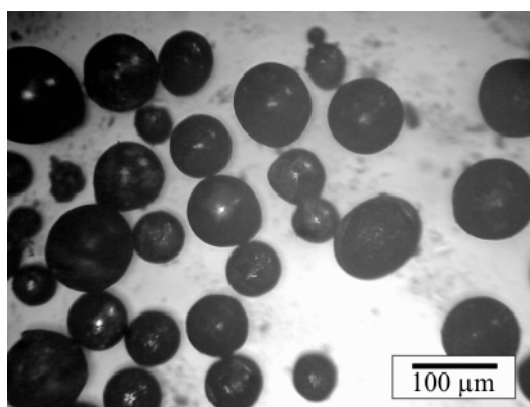
Напилення електродугових покриттів проводили на установці КДМ-2, в комплект якої входить електродуговий апарат ЕМ-14М з центральною сопловою системою подачі стисненого повітря та джерело живлення «Тимез-500», призначене для живлення електричної дуги металізаційного апарату постійним струмом.

Напилення покриттів виконували на пластини з вуглецевої сталі 45 розміром 50x20x5 мм. Товщину покриттів визначали замірами до та після напилення штангенциркулем. Товщина напилених покриттів складала 0,8...1,5 мм.

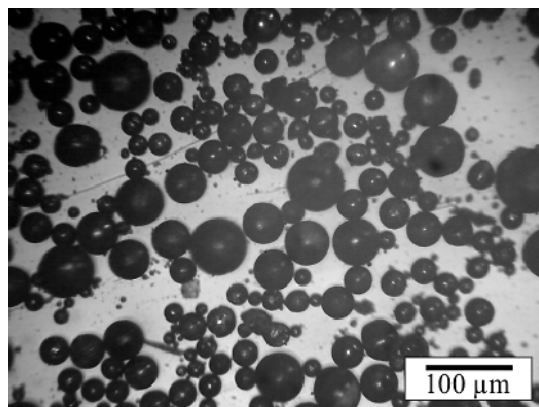
Твердість  $HV_5$  визначалася на приладі типу ТП при навантаженні на індентор 5 кг (ДСТУ ISO 6507-4:2008). Міцність зчеплення покриттів з основою визначали на розривній машині УММ-5. Визначення зносостійкості покриттів проводили на машині тертя СМЦ-2. Зважування зразків проводили на лабораторних вагах моделі ТВЕ-0.21.

### 3.2 Дослідження гранулометричного складу напилюваних частинок

Гранулометричний склад напилюваних частинок визначали металографічним методом по пробам, зібраним при напиленні у воду. Знімки часток отримували цифровою камерою *Delta Optical HDCE-20C*, що укомплектована програмним забезпеченням *Scope Image 9.0* (рис. 3.1).



*a*



*б*

Рисунок 3.1 – Проби напилюваних у воду частинок при електродуговому напиленні: *a* – напилення по традиційній технології; *б* – напилення модернізованим розпилювачем

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

Отримані знімки аналізували у програмному металографічному комплексі *MEGRAN*. Всього проаналізовано по 5 проб, в кожен з яких входило біля 100 частинок. Результати досліджень приведені на рис. 3.2.

Для оцінки ефекту здрібнення частинок знайдемо середні визначені значення діаметру частинок за формулою:

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n w_i d_i \quad (3.1)$$

де  $w_i$  – кількість частинок;  $d_i$  – середнє у діапазоні значення розміру частинок, мкм.

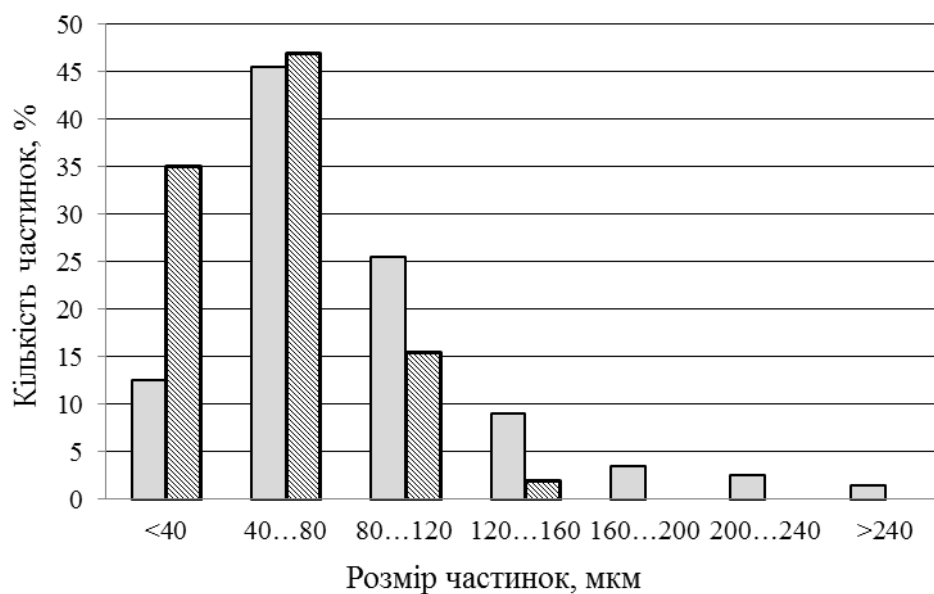


Рисунок 3.2 – Гранулометричний склад напилюваних частинок при електродуговому напиленні сталі 65Г:

- – напилення проводили по традиційній технології;
- ▨ – напилення модернізованим розпилювачем

Для електродугового напилення дротом 65Г за традиційною технологією середнє визначене значення діаметру частинок складає:

$$\bar{d} = 20 \cdot 0.125 + 60 \cdot 0.455 + 100 \cdot 0.255 + 140 \cdot 0.09 + 180 \cdot 0.035 + 220 \cdot 0.025 + 260 \cdot 0.015 = 83.6 \text{ мкм}$$

Для електродугового напилення дротом 65Г з використанням модернізованого розпилювача:

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

$$\bar{d} = 20 \cdot 0.35 + 60 \cdot 0.47 + 100 \cdot 0.155 + 140 \cdot 0.02 = 53.5 \text{ мкм.}$$

Таким чином, результати досліджень показали, що при використанні модернізованого розпилювача на оптимальному режимі спостерігається додаткове подрібнення частинок у двофазному потоці зі зменшенням їх середнього визначеного розміру з 83,6 мкм до 53,5 мкм за рахунок збільшення швидкості витікання стисненого повітря і підвищення температури при використанні пропану.

### 3.3 Дослідження швидкості частинок у високотемпературному струмені при електродуговому напиленні сталі 65Г

Відомо, що адгезійні та когезійні властивості електродугових покриттів у значній мірі визначаються швидкістю руху напилюваних частинок. Визначити цю характеристику за допомогою математичного моделювання досить складно через велику кількість факторів, що впливають на неї та складний характер взаємодії частинок з високотемпературним газовим потоком. Тому доцільно використовувати експериментальні методи визначення швидкості напилюваних частинок. Останнім часом набув розвитку метод визначення швидкості частинок при газотермічному напиленні за допомогою швидкісної цифрової відео та фотозйомки. Його практикують як іноземні так і вітчизняні вчені. З сучасним розвитком цифрової техніки даний метод став більш доступний, тому його й обрали для визначення швидкості частинок у даній роботі.

Знімки двофазних високотемпературних струменів отримували за допомогою цифрової фотокамери Nikon D300, що являє собою цифрову однооб'єктивну фотокамеру зі світлочутливою CMOS-матрицею. Дозволяє отримувати знімки розрішенням 12,3 мегапікселей витримкою (експозицією) від 30 до 0,125 мс. З огляду на те, що швидкість частинок при електродуговому напиленні складає до 100 м/с, а дистанція напилення лише 100 мм, експозицію зйомки для фіксації треків частинок обрали 0,25 мс. Зйомку проводили з дистанції 2 м.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

Швидкість частинок можна визначити як відношення шляху, який пролетіла частинка (довжина треку) до часу, за який цей шлях пройдено (час експозиції). Для кожного методу напилення проаналізовано близько 10 знімків, на кожному з яких визначено швидкість 10 частинок. Швидкість частинок визначали на відповідній дистанції напилення: для електродугового методу – 80...120 мм на різній відстані до осі струменя. Приклади проаналізованих знімків двохфазних високотемпературних потоків при електродуговому напиленні показані на рисунку 3.3.



*а*



*б*

Рисунок 3.3 – Знімки струменя при електродуговому напилюванні дроту 65Г (експозиція 0,25 мс):

*а* – напилення за традиційною технологією; *б* – модернізованим розпилювачем

Як показали результати досліджень, при використанні модернізованого розпилювача ЕМ-14М на оптимальному режимі спостерігається збільшення довжини треків та, як наслідок, підвищення середньої підлітної швидкості частинок. Для електродугового напилення дротом 65Г середня підлітна швидкість частинок по перерізу високотемпературного двохфазного струменя на

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

дистанції 100 мм від зрізу сопла металізатора підвищилася з 60,7 м/с до 73,5 м/с (+21 %). Збільшення швидкості частинок можна пояснити зменшенням їх розміру, оскільки відомо, що частинки меншого діаметру швидше прискорюються. Так, наприклад, у роботі показано, що при зменшенні фракції частинок при електродуговому напиленні з 237 мкм до 10 мкм їх швидкість на робочій дистанції 100 мм зростає з 77 м/с до 203 м/с.

### 3.4 Дослідження мікроструктури отриманих покриттів

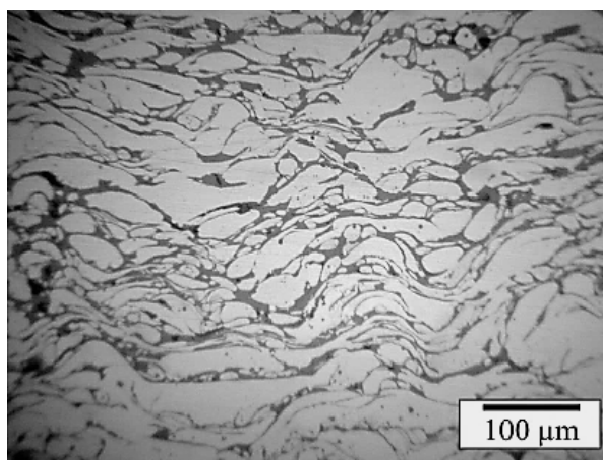
Для дослідження мікроструктури отриманих електродугових покриттів виготовлялись мікрошліфи. Для виготовлення поперечних шліфів сталіні пластини з нанесеним покриттям перерізали пополам по всій довжині, затискали в сталеві струбцини для запобігання «завалів» та відшаровувань покриття в процесі шліфування по їх кромкам.

Шліфування проводили вздовж зразка на універсально-заточному верстаті моделі 3Е642. Шліфування зразків проводили периферією шліфувального круга на наступних режимах: частота обертання шпинделя не перевищувала 6400 об/хв, швидкість поздовжнього переміщення стола становила 1...3 м/хв, глибина врзання шліфувального круга в зразок за два проходи складала 0,025 мм. Шліфувальний круг використовували з умовним позначенням І 150х20х32 25А 10-ІІ С2 7 КІА 35 м/с А І кл. ГОСТ 2424-83. Подальше доведення шліфів виконували на верстаті марки Р-2Г з послідовним використанням електрокорундових шкуроч № № 32, 16 і 8, водостійких шкуроч "КЗ" № № 4 і 5 і шкуроч мікронної зернистості М40, М20. На папері кожного номера зразок шліфувався тільки в одному напрямку. При зміні абразивного матеріалу зразки промивалися в струмені води. Після закінчення шліфування зразки промивалися в 96% етиловому спирті і висушувалися. Швидкість шліфування регулювали шляхом зміни положення зразка на колі при незмінному числі обертів диска. Отримана в результаті механічної шліфовки шорсткість поверхні шліфа становила приблизно 0,63...0,50 мкм.

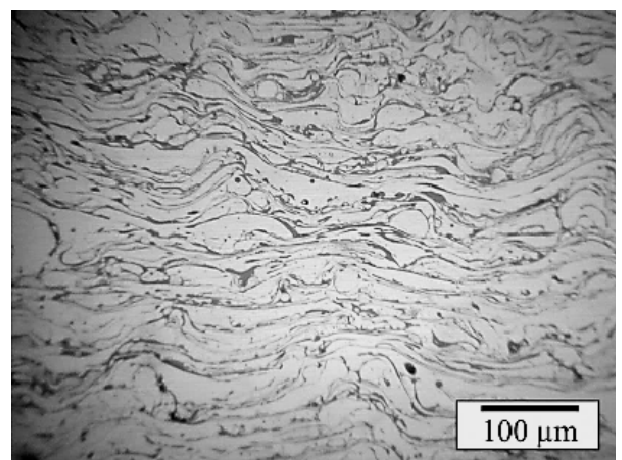
|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

Поліровку мікрошліфів виконували механічним способом на верстаті з горизонтальним диском, обтягнутим приладовим сукном. Частота обертання диска діаметром 200 мм не перевищувала 1200 об/хв. Після закінчення полірування зразки промивалися в етиловому спирті і висушувалися.

Для досліджень використовували оптичний мікроскоп ММУ-3. Знімки мікроструктур отримували цифровою камерою Delta Optical HDCE-20C, що укомплектована програмним забезпеченням Scope Image 9.0. Для визначення розміру масштабної лінійки під час зйомки використовували об'єкт-мікрометр ГОСТ 7513-55. Мікроструктури електродугових покриттів показані на рис. 3.4.



*a*



*б*

Рисунок 3.4 – Мікроструктура електродугового покриття з дроту 65Г:

*a* – покриття, отримане за традиційною технологією; *б* – покриття, нанесене модернізованим розпилювачем на оптимальному режимі

Аналіз приведених мікроструктур свідчить, що при напиленні модернізованим електродуговим розпалювачем відбувається здрібнення структурних елементів покриття: при напиленні за традиційною технологією середнє значення товщини ламелей електродугового покриття складає близько 14 мкм, при використанні модернізованого розпилювача середнє значення цього параметру зменшується до 7 мкм. Твердість отриманих покриттів за Віккерсом  $HV_5$  складає 3,6 ГПа, що на 12% більше ніж при напилюванні за традиційною технологією (3,2 ГПа). Також встановлено що пористість покриття зменшується з

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.51213.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |



зчеплення покриттів з основою напилення виконували в один прохід на 5 зразків. На рис. 3.6 представлені результати по визначенню міцності зчеплення покриттів з основою.

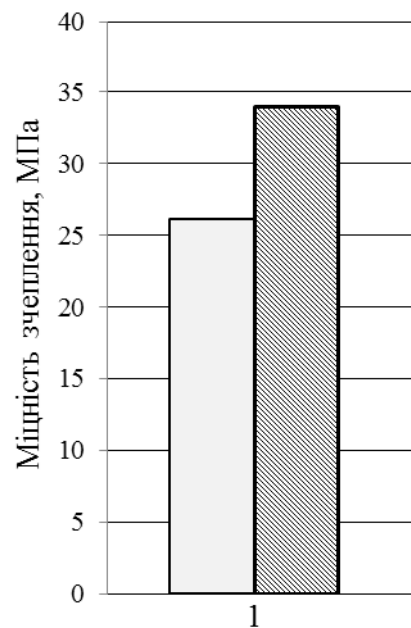


Рисунок 3.6 – Результати визначення міцності зчеплення електродугових покриттів із дроту 65Г:

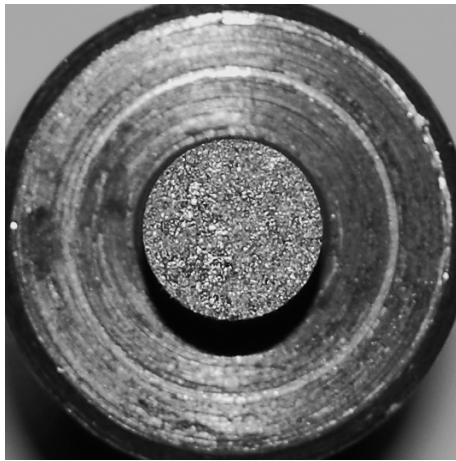
□ – напилення проводили за традиційною технологією;

▨ – з використанням модернізованого розпилювача на оптимальному режимі.

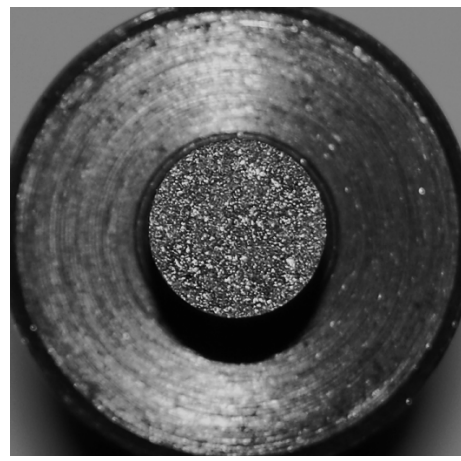
Аналіз приведених результатів показує, що при використанні модернізованого розпилювача спостерігається підвищення міцності зчеплення електродугового сталюого покриття з дроту 65Г на 30% (з 26 до 34 МПа). На рис. 3.7 приведені зразки після випробувань на міцність зчеплення електродугового покриття з дроту 65Г з основою, яка виготовлена зі сталі 45.

Таким чином, підвищення адгезійної міцності покриттів, отриманих з використанням модернізованого розпилювача, можна пояснити збільшенням фактичної площі контакту частинок з основою (рис. 3.7), що зменшує результуюче навантаження на одиницю площі нанесеного покриття. Пояснюється даний ефект підвищеною швидкістю та температурою напилюваних частинок, а також меншим ступенем окиснення за рахунок використання пропану.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |



*a*



*б*

Рисунок 3.7 – Зразки після випробувань на міцність зчеплення електродугових покриттів: *a* – напилення проводили за традиційною технологією; *б* – з використанням модернізованого розпилювача на оптимальному режимі

### 3.6 Дослідження зносостійкості покриттів

#### 3.6.1 Методика визначення зносостійкості покриттів

Визначення зносостійкості покриттів проводили на машині тертя СМЦ-2. Машина даної моделі складається з наступних основних вузлів (рис. 3.8): 1 – каретка, 2 – механізм навантаження; 3 – бабка нижнього зразка; 4 – датчик; 5 – привід; 6 – пульт керування.

Каретка призначена для проведення досліджень без змащування та зі змащуванням зразків:

- диск по диску при терті кочення і терті кочення з проковзуванням;
- диск – колодка при терті ковзання.

Конструкцією каретки передбачається і осьове переміщення каретки уздовж осі труби. Від осьового переміщення в процесі випробувань каретка фіксується за допомогою фіксатора. Відкидання каретки і осьове її переміщення використовується при установці камери для випробування круглих зразків і

зразків «диск-колодка». У корпусі каретки в підшипниках монтується вал, на який за допомогою спеціальної гайки кріпиться верхній зразок.

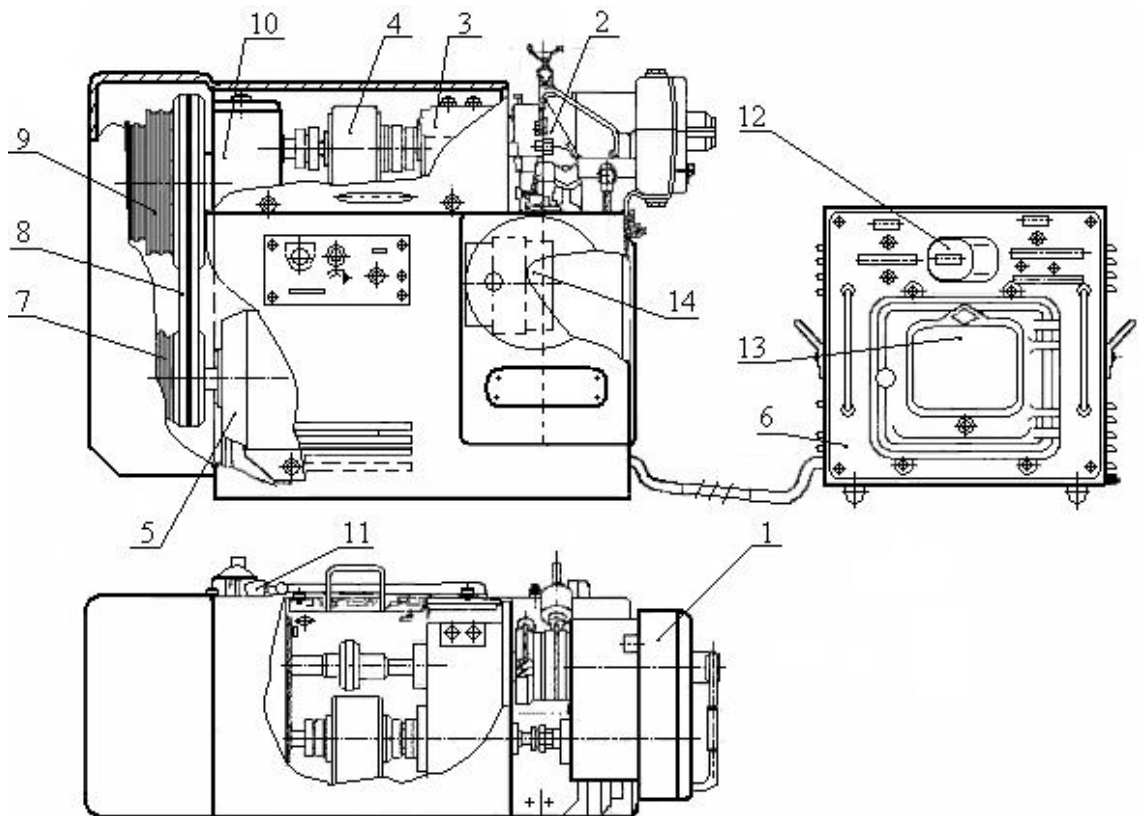


Рисунок 3.8 – Загальний вигляд машини тертя СМЦ-2:

1 – каретка; 2 – механізм навантаження; 3 – бабка нижнього зразка; 4 – датчик; 5 – привід; 6 – пульт керування; 7 – трьохступінчатий шків; 8 – клинові ремні; 9 – провідний шків; 10 – редуктор; 11 – вимикач; 12 – лічильник кількості обертів нижнього зразка; 13 – потенціометр

Вал отримує обертання через змінні колеса від валу, встановленого в підшипниках. Підбором відповідних пар змінних коліс можна змінити число обертів верхнього зразка з метою отримання необхідного відсотка проковзування верхнього зразка щодо нижнього, швидкість обертання якого забезпечується клиноремінною передачею. Щоб виключити навантаження на зразки від невірноважених мас консольно закріпленої каретки, машина містить противагу, яка розміщується всередині станини машини.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

Визначення зносостійкості проводилося за схемою «диск-колодка» (рис. 3.9). Колодку і диск виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45. Плазмові покриття наносили на колодку, а електродугові на диск на оптимальних режимах електроімпульсного впливу. Такий вибір пояснюється тим, що електродуговим методом, в основному, відновлюють деталі типу «вал», а плазмовим методом наносять бронзові покриття на підшипники ковзання. Перед нанесенням покриття колодку та диск знежирювали етиловим спиртом і піддавали струменево-абразивній обробці.

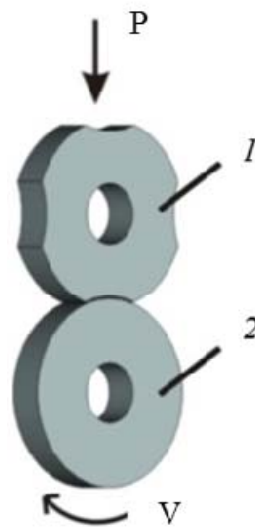


Рисунок 3.9 – Схема визначення зносостійкості покриттів:

1 – колодка; 2 – диск

Колодки (при випробуванні на зносостійкість електродугових покриттів) та диски (при випробуванні плазмових покриттів) піддавалися термічному поліпшенню. Гартування сталевих дисків та колодок здійснювали з температури 840° С і витримці протягом 50 хв. Охолодження виконували у воді. Після гартування твердість складала 54...55 HRC. Потім проводили відпуск при температурі 550 °С, витримували протягом 1 години і охолоджували на повітрі. Твердість після відпуску складала 30...32 HRC.

|     |       |             |        |      |                              |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|------------------------------|------|
|     |       |             |        |      | <p>КР.131.5121з.01.00.ПЗ</p> | Лист |
|     |       |             |        |      |                              |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                              |      |

Отримані зразки встановлювалися на вали машини тертя СМЦ-2 таким чином, щоб радіальне биття їх при провертанні валів від руки не перевищувало 0,1 мм. Далі проводили притирання колодки до диску при окружній швидкості обертання диска 1,3 м/с і тиску на колодку 1 МПа. Притирання проводили до тих пір, поки не притерлося 90% площі покриття. Для змащування пари тертя використовували моторне мастило марки М10Г2К ГОСТ 8581-75. Швидкість подачі мастила складала 1 г/хв, окружна швидкість обертання диска – 0,8 м/с, тиск на колодку – 4 МПа.

Знос покриттів визначали за втратою маси зразка. Перед зважуванням зразки ретельно промивалися в 96% етиловому спирті і висушувалися. Зважування зразків проводили на лабораторних вагах моделі ТВЕ-0.21 на кожному зразку по п'ять разів. Обробку результатів зносостійкості проводили методами математичної статистики. Визначення середнього зносу розраховували з довірчою ймовірністю 0,95.

Результати визначення зносостійкості покриттів приведені на рис. 3.10.

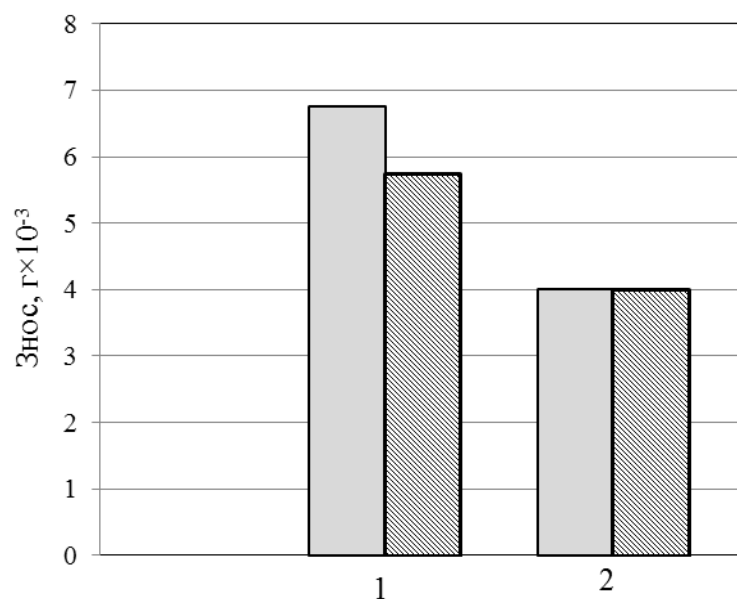


Рисунок 3.10 – Результати визначення зносостійкості покриттів:

1 – електродугових покриттів, нанесених за традиційною технологією; 2 – електродугових покриттів, нанесених модернізованим розпилювачем на оптимальному режимі; ■ – покриття; ▨ – контроліло

Аналіз результатів визначення зносостійкості (рис. 3.10) показав, що електродугове покриття, нанесене модернізованим розпилювачем на оптимальному режимі, має в 1,4 рази менший знос, ніж покриття, напилене за традиційною технологією. Збільшення зносостійкості пов'язане з підвищенням твердості електродугового покриття на 12%, а також збільшення його щільності за рахунок підвищення швидкості часток при напилювання та зменшення, як наслідок, пористості. Щільність покриття збільшується за рахунок зменшення розмірів частинок, які беруть участь у формуванні покриття.

На рисунку 3.11 приведені поверхні тертя отриманих електродугових покриттів.

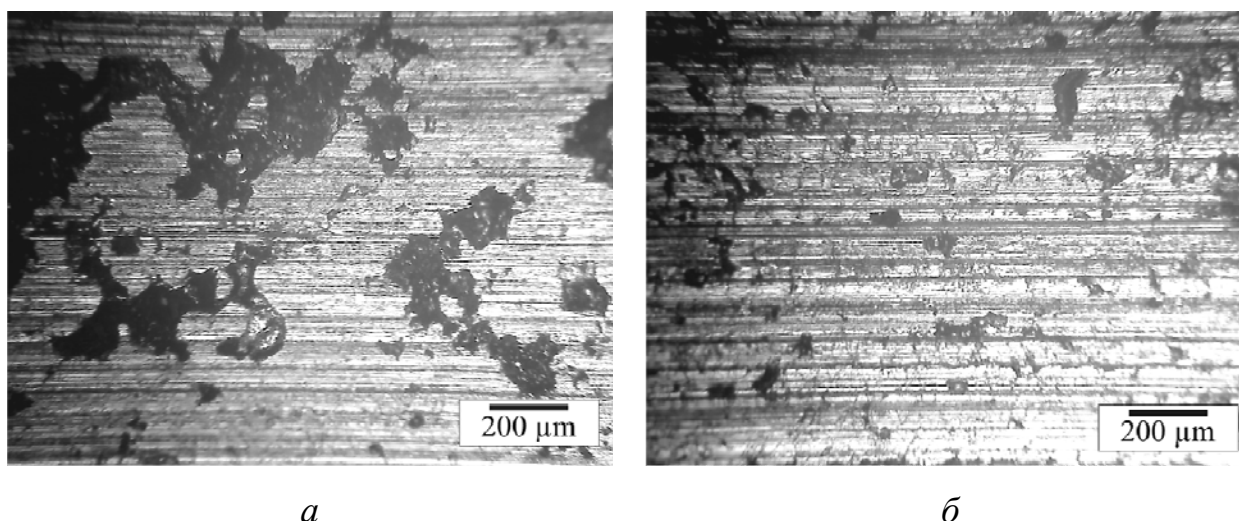


Рисунок 3.11 – Поверхні тертя електродугових з дроту Св-08Г2С (*a, б*) та плазмових з порошку ПГ-19М-01 покриттів (*в, г*): *a, в* – напилення проводили за традиційною технологією; *б, г* – з використанням електроімпульсної дії на оптимальному режимі

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 модернізованим розпилювачем на оптимальному режимі (рис. 3.11 *б*) являються більш щільними та мають

пористість на 44% меншу, ніж покриття напилені за традиційною технологією (рис. 3.11 *а*). Також на рис. 3.11 *б* видні сліди тертя меншої глибини, які більш рівномірно розташовані по поверхнях тертя, що призводить до меншого зносу.

### **Висновки.**

1. Аналіз результатів визначення зносостійкості показав, що електродугове покриття, нанесене модернізованим розпилювачем на оптимальному режимі, має в 1,4 рази менший знос, ніж покриття, напилене за традиційною технологією.

2. Збільшення зносостійкості пов'язане з підвищенням твердості електродугового покриття на 12%, а також збільшення його щільності за рахунок підвищення швидкості часток при напилювання та зменшення, як наслідок, пористості.

3. Щільність покриття збільшується за рахунок зменшення розмірів частинок, які беруть участь у формуванні покриття.

4. 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.

5. Поверхні тертя покриттів, напилених модернізованим розпилювачем на оптимальному режимі являються більш щільними та мають пористість на 44% меншу, ніж покриття напилені за традиційною технологією.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

## 4 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО НАНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ МОДЕРНІЗОВАНИМ РОЗПИЛЮВАЧЕМ ЕМ-14М

Під час розробки технологічних рекомендацій щодо напилення газотермічних покриттів використовували ОСТ 5.9957-85. Технологічний процес отримання газотермічних покриттів складається з наступних видів робіт, які виконуються послідовно:

- вибір і підготовка матеріалів, які застосовуються при нанесенні газотермічних покриттів;
- підготовка поверхні під нанесення газотермічного покриття.
- вибір режиму напилення газотермічного покриття.
- напилення газотермічного покриття.
- механічна обробка напилених покриттів.
- визначення фізико-механічних властивостей напилених покриттів.

### 4.1 Вибір і підготовка матеріалів, які застосовуються при нанесенні газотермічних покриттів

Вихідні матеріали повинні відповідати вимогам державних стандартів і технічних умов на поставку. Перелік рекомендованих матеріалів наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Перелік рекомендованих матеріалів

| Найменування матеріалу | Позначення документа |
|------------------------|----------------------|
| Електрокорунд          | ГОСТ 3647-80         |
| Стиснене повітря       | ГОСТ 9010-84         |
| Пропан                 | ГОСТ 20448-90        |
| Дріт марки 65Г         | ГОСТ 9389            |

Матеріали, які застосовуються при струменево-абразивній обробці, повинні бути сухими, без масляних та інших забруднень.

Стиснене повітря, яке застосовується при підготовці поверхні під нанесення покриття, не повинно містити вологи і масла. Очистку стисненого повітря слід проводити шляхом пропускання через вологомастиловідділювач відповідно до ОСТ 5.9829-81. Клас забрудненості стисненого повітря повинен бути непарним по ГОСТ 17433-84.

Усунення вигинів і нерівностей дроту, а також його очистку від бруду та мастила слід проводити в процесі механізованого намотування на касети на спеціальному верстаті типу СПНП-2, який повинен бути забезпечений пристроєм для протирання дроту чистою ганчіркою, змоченою в ацетоні. При намотуванні ділянки дроту з вм'ятинами і розшаруваннями її необхідно видаляти. Дріт повинний мати гладку і чисту поверхню і не мати вм'ятин, вигинів і розшарувань. Діаметр дроту становить від 1,2 до 2 мм.

Очищений дріт слід зберігати в сухому опалювальному приміщенні бухтами в захищеному від пилу місці.

#### **4.2 Підготовка поверхні під нанесення газотермічного покриття**

Підготовка поверхні під нанесення газотермічного покриття складається з наступних операцій:

- знежирення;
- захист поверхні, що не підлягає струменево-абразивній обробці;
- струменево-абразивна обробка;
- захист поверхні, що не підлягає нанесенню покриття.

Знежирення поверхні слід проводити по ОСТУ 5.9582-81 із застосуванням зазначених в стандарті водних лужних розчинів.

Струменево-абразивну обробку слід проводити відповідно до ОСТ 5.9829-81. Поверхні, що не підлягають обробці, повинні бути захищені від впливу абразивних частинок екранами з металу або іншого абразивно-стійкого матеріалу (наприклад, гуми, фторопласту і т.д.). Рекомендований спосіб захисту полягає в

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

нанесенні шару пасти наступного складу: криоліт – 30%, рідке скло – 10%, вода – 60%. В процесі нанесення покриття паста перетворюється на кірку, яка легко видаляється з поверхні щітками.

Для струменево-абразивної обробки слід застосовувати установку марки 026-7 "Ремдеталь" або інший тип обладнання для струменево-абразивної підготовки поверхні з використанням в якості абразива електрокорунду марки 7Б, шліфзерно номер 125.

Струменево-абразивну обробку поверхні необхідно проводити на наступному режимі:

Тиск стисненого повітря, МПа ..... 0,4...0,6;

Відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні, мм ..... 50...120;

Діаметр сопла, мм ..... 8...12;

Кут падіння струменя на оброблювану поверхню, град ..... 60...90;

Лінійна швидкість переміщення пістолета, мм/хв ..... 50...400.

Обробка ведеться в кілька проходів. Зона струменево-абразивної обробки повинна бути більше зони напилення на ширину не менше 5 мм з кожного боку.

Після струменево-абразивної обробки необхідно видалити металевий пил з обробленої поверхні. Пил слід видаляти пилососом промислового призначення.

На підготовленій до нанесення покриття поверхні не допускається наявності мастила, вологи, пилу, плям від захоплення руками та інших забруднень. Підготовлена поверхня повинна мати сірувато-матовий відтінок. Значення параметрів шорсткості за ГОСТом 9.304-84. Після закінчення процесу підготовки поверхні під напилення категорично забороняється торкатися до підготовленої поверхні руками і брудним інструментом.

При підготовці та транспортуванні, підготовлених до нанесення покриттів деталей, необхідно користуватися знежиреними, чистими інструментами і пристосуваннями, а також чистими брезентовими або бавовняними рукавичками ГОСТ 10354-82.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

У разі неможливості нанесення покриття безпосередньо після підготовки, оброблену поверхню необхідно покрити чистою поліетиленовою плівкою для запобігання потрапляння на неї масла, вологи, пилу.

Підготовлені заготовки до нанесення покриття слід зберігати у виробничих приміщеннях при температурі повітря не нижче 15 °С і відносній вологості не вище 70%, а при необхідності, допускається зберігати на відкритих площах при температурі не нижче +5 °С. Вміст у повітрі корозійно-активних реагентів не допускається.

Термін зберігання заготовок, підготовлених до напилення покриття, тобто перерва між закінченням струменево-абразивної обробки і початком нанесення покриття, не повинен перевищувати 5 годин.

У разі порушення вимог до процесу підготовки, транспортування і зберігання заготовок з обробленою поверхнею рекомендується повторити всю послідовність операцій підготовки.

#### **4.3 Напилення газотермічного покриття**

Нанесення електродугових покриттів слід проводити за допомогою установки КДМ-2, до складу якої входить модернізований електродуговий розпилювач ЕМ-14М.

Рекомендований режим напилення електродугового покриття при використанні дроту 65Г діаметром 1,2 мм:

Сила струму, А ..... 110;

Напруга, В ..... 25;

Витрати стисненого повітря, кг/год ..... 12,5;

Тиск стисненого повітря, МПа ..... 0,6;

Дистанція напилення, мм ..... 80.

Критерії якості нанесених електродугових та плазмових покриттів: мінімальні показники пористості, кількість несучільностей на лінії підкладка – покриття.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

Необхідну товщину покриття отримують переміщенням розпилювача щодо напилюваної поверхні у 3...5 проходів. Покриття наносити з припуском на подальшу шліфовку не менше 0,3 мм.

При нанесенні покриття нагрів підкладки не повинен перевищувати 100 – 150 °С. Для охолодження поверхні допускається короточасні перерви (до 10 хв.) між закінченням одного і початком іншого проходу розпилювача.

При напиленні необхідно, щоб встановлені значення параметрів режиму напилювання не змінювалися. Горіння електричної дуги повинно бути стійким без пульсацій, подача дроту відбуватися рівномірно, без закупорки отворів бронзового робочого сопла і без потрапляння на напилювану поверхню каплеподібних частинок металу.

В процесі напилення і по його закінченню контролюється стан напилюваної поверхні: відсутність сторонніх включень, тріщин, сколів, відшарувань, здуття, не проплавлених частинок, місць перегріву. При виявленні ділянок з перерахованими дефектами необхідно провести механічну обробку цих ділянок і довколишнього покриття на відстані 20 – 40 мм. При цьому допускається зменшення товщини покриття на 50%. Потім провести підготовку поверхні оброблених ділянок та нанести покриття заново.

Товщину нанесеного покриття визначають вимірами лінійних розмірів (діаметра) до і після напилення мікрометром або штангенциркулем.

Шліфування отриманого покриття проводити за стандартною технологією на круглошліфувальних верстатах 3А423 або круглошліфувальних верстатах іншого типу.

Контроль оброблених покриттів за зовнішнім виглядом проводиться з метою виявлення зовнішніх дефектів – сколів, здуття, відшарувань, тріщин, раковин. Огляд здійснюється за допомогою лупи 10-кратного збільшення ЛИ-3, ЛИ-4 по ГОСТу 25706-83 при коефіцієнті природної освітленості на поверхні виробу не менше 1,5. При висвітленні лампами розжарювання освітленість на рівні робочого місця повинна бути не менше 150 лк, при висвітленні

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

люмінесцентними лампами по ГОСТу 1182-77 не менше 300 лк. При наявності одного із згаданих дефектів виріб бракується.

#### **4.4 Визначення фізико-механічних властивостей напилених покриттів**

Контроль мікроструктури здійснюється при збільшенні у 300 крат. Пористість напилених покриттів визначається комп'ютерним мікроструктурним аналізом за допомогою програм для металографічного аналізу типу MEGRAN, Jmicrovision, Siams, або за планіметричним методом.

Пористість покриттів, нанесених модернізованим розпилювачем повинна скласти 3...4%. Твердість покриттів за Віккерсом визначати за допомогою приладу типу ТП при навантаженні на індентор 5 кг. Твердість HV<sub>5</sub> покриттів, нанесених модернізованим електродуговим розпилювачем з дроту 65Г повинна дорівнювати 3,2 ГПа.

#### **Висновки.**

1. Розроблені технологічні рекомендації щодо процесу напилення сталевих електродугових покриттів із сталі марки 65Г модернізованим розпилювачем ЕМ-14М, що дозволило підвищити фізико-механічні та експлуатаційні властивості покриттів.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

## 5 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ НАНЕСЕННІ ПОКРИТТІВ

Статистичні дані про виробничий травматизм свідчать про те, що його рівень у цілому світі безперервно зростає та становить, за даними МОП, біля 125 мільйонів випадків щорічно. У розвинених країнах із високим технічним рівнем він значно менший, ніж у країнах, що розвиваються, в тому числі в Україні. В країнах Євросоюзу від нещасних випадків та професійних захворювань потерпають щорічно близько 10 мільйонів осіб, з яких майже 8000 гине. В цілому по всіх країнах земної кулі кожні 3 хвилини гине людина, а кожні 2 секунди травмуються 8 осіб. Ціна помилки однієї людини безперервно зростає: якщо відразу після другої світової війни від помилки однієї людини гинуло в середньому 2...4 особи, то сьогодні ця цифра наближається до 10.

За статистикою, в Україні щоденно на виробництві травмуються 80...85 осіб, із них до 10% стають інвалідами і до 2% гине.

За даними американських учених, виростити, навчити і підготувати до самостійної праці людину коштує в середньому від 120 до 400 тисяч доларів. В Україні ця цифра значно менша, але досить вагома: 56...200 тисяч. Такої суми недораховується суспільство, якщо людина втрачає працездатність у період найбільш активного й продуктивного віку – 18...40 років, при цьому суспільство додатково витрачає кошти на її утримання та лікування. Крім того, така людина не приносить матеріальної користі суспільству (яку важко підрахувати) так, якби вона працювала і віддавала свої знання та працю людям.

Основні причини смертельних травм в машинобудуванні:

- невиконання вимог посадових інструкцій – 13%;
- порушення трудової й виробничої дисципліни – 10%;
- допуск до роботи без навчання та перевірки знань – 6%.

Найбільша кількість нещасних випадків пов'язана з організаційними (64%), технічними (27%), психофізіологічними (9%) причинами.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

## 5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів, що впливають на персонал під час напilenня електродугових покриттів

Умови роботи визначаються двома загальними показниками: впливом виробничого процесу, пов'язаним з робочою позою, нервово-психічним станом, напруженістю м'язів і виробничими обставинами під час роботи, що впливають на стан здоров'я людини, нервово-м'язову та психологічну діяльність.

Складовими виробничих обставин є:

- організаційні форми виробничих процесів;
- прийнятий регламент;
- темп і ритм роботи;
- режим роботи та відпочинку;
- санітарно-гігієнічні умови у виробничому приміщенні та на робочому місці;
- умови, які забезпечують безперебійну високопродуктивну роботу (організація робочих місць, виробничий інструктаж та ін.);
- форми керування виробничим процесом;
- соціальний мікроклімат у виробничому колективі.

Несприятливі умови роботи примушують організм людини витрачати енергію на переборювання впливу шкідливих факторів. Внаслідок чого, зростає втома організму, що підвищує ймовірність нещасного випадку, оскільки виснажений організм не може ефективно реагувати на зміни, які відбуваються навколо, навіть якщо ці зміни небезпечні для нього. Дія несприятливих умов роботи може бути також причиною захворювань робітників – професійно або виробничо обумовлених.

До фізичних небезпечних і шкідливих виробничих факторів на ділянці нанесення покриттів електродуговим методом відносять:

- Посудини, які працюють під тиском.

Небезпечними при електродуговому напилюванні є ресивери, балони з робочим газом (повітрям), які перебувають під тиском:

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

– Підвищена запиленість (металевий пил) і загазованість повітря робочої зони.

У процесі нанесення покриттів електродуговим методом металевий дріт плавиться електричною дугою високої температури, яка має (до 5000 °С), що призводить до випару й вигоряння металевого дроту, тим самим, створюючи металевий пил. Крім того, отримані частки розплавленого металу із дрітів–електродів переносяться вбік напилюваної поверхні стисненим газом (повітрям), що також приводить до створення металевого пилу й загазованості робочого місця.

– Підвищений рівень шуму, вібрацій, інфразвукових коливань, ультразвуку, що іонізують випромінювання, статичної електрики, електромагнітних випромінювань.

Робота устаткування для електродугового напилювання створює високий рівень шуму й вібрації, що перевищує припустимі норми й стає причиною виникнення професійних захворювань. Робота розпилювачів, які використовуються при електродуговому напилюванні, супроводжується світловим випромінюванням електричної дуги;

– Підвищений або знижений барометричний тиск, рухомість повітря.

Під час напилювання транспортуєчий газ (повітря) подається під тиском і розігрівається, що призводить до виникнення рухомості повітря;

– Небезпечне значення напруги в електричному ланцюзі;

Електродугові розпилювачі працюють при високій силі струму й напрузі, що небезпечно для життя.

– Відсутність або недолік природного світла, недостатня освітленість робочої зони, підвищена яскравість світла.

Проблеми освітлення робочої зони приводять до захворювань органів зору.

– Пряме й відбите випромінювання, що створює сліпучу дію.

Випромінювання електричної дуги й розплавлених часток металу створює сліпучу дію, тому дивитися на сформований двофазний струмінь незахищеним оком небезпечно.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

Дія окремих несприятливих факторів виробничого середовища може привести до виробничої травми – порушенню анатомічної цілісності організму людини або його функцій внаслідок впливу виробничих факторів.

Часто травма є наслідком нещасного випадку. Нещасний випадок на виробництві – раптовий вплив на працівника небезпечного виробничого фактора або середовища, внаслідок якого заподіяно шкоди здоров'ю або наступила смерть.

Освітлення виробничих приміщень – один з основних факторів зовнішнього виробничого середовища, що впливає на людину в процесі роботи. Безпечна й високопродуктивна робота може бути лише при умовах гарного висвітлення робочих місць [4].

Недостатнє й нерівномірне освітлення робочих місць призводить до перенапруги зору, перевтоми організму й виникненню надмірної нервової дратівливості, ослаблення уваги.

Негативно впливає на зір не тільки недостатня освітленість, а й занадто яскраве освітлення. Перевищення норм яскравості веде до зниження функцій зору, викликає роздратування та різі в очах, головний біль.

Низький рівень освітленості, нерівномірність висвітлення, світлові промені, які б'ють в очі, відблиски від блискучих поверхонь можуть бути причиною нещасних випадків, браку продукції та низької продуктивності праці.

Використовується як природне, так і штучне освітлення виробничих приміщень. Природне освітлення характерно для світлого часу доби й при роботі в приміщеннях, де є прорізи в стінах і даху будов. При штучному освітленні застосовуються відповідні освітлювальні установки штучного світла.

Система освітлення повинна забезпечити:

- достатню освітленість і рівномірний розподіл світлового потоку на робочій поверхні;
- сталість величини освітлення;
- виключення глибоких тіней;

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

- відсутність різкого розходження в яскравості робочих поверхонь і навколишнього тла (стіни, стелі);
- відсутність сліпучої дії джерела світла великої яскравості.

Основним документом, що визначає необхідні норми освітленості робочих поверхонь, є діючі будівельні норми й правила СНиП II– 4 – 79 (зі змінами й доповненнями 1986 р.).

Цих норм необхідно дотримуватися при проектуванні освітлення приміщень будинків і споруджень різного призначення, місць проведення робіт поза будинками, а також зовнішнього освітлення [4].

## **5.2 Вимоги техніки безпеки при напилюванні покриттів електродуговим методом**

До роботи на установках електродугового напилювання допускаються особи не молодші 18 років, що мають кваліфікацію електрозварювальника та пройшли інструктаж з техніки безпеки.

Перш ніж приступитися до роботи з нанесення покриттів з металів і їхніх сплавів, з якими раніше робота не проводилася, необхідно одержати довідку від служби техніки безпеки підприємства, де проводяться роботи, про їхню токсичність і додаткові заходи, необхідні для забезпечення безпеки, а також дозвіл на проведення зазначених робіт на металізаційній ділянці. Все електроустаткування, застосовуване для процесу електрометалізації, повинне бути надійно заземлено.

Особи, які працюють на електродугових металізаційних установках, повинні:

- Проходити періодично (кожні 1...2 роки) медичні огляди.
- Пройти курс навчання, здати іспити й одержати свідчення на право роботи на установках і за "Правилами розташування й безпечної експлуатації ємностей, що перебувають під тиском" пройти інструктаж на робочому місці.
- Бути забезпечені спецодягом, спецвзуттям і засобами індивідуального захисту.

|     |       |             |        |      |                              |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|------------------------------|------|
|     |       |             |        |      | <b>КР.131.5121з.01.00.ПЗ</b> | Лист |
|     |       |             |        |      |                              |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                              |      |

При нанесенні покриттів оператор повинен бути одягнений у спеціальний брезентовий одяг з вогнестійким просоченням із захищеними накладками зі спилка по ТУ 17-08-69-77, взуттям за ДСТ 12.4. 010-75, рукавицями за ДСТ 12.010-75, рукавичками за ДСТ 1108-74 або ДЕРЖСТАНДАРТ 5007-75.

Для захисту обличчя та очей працівника від світлового випромінювання електричної дуги – щитки захисні за ДСТ 12.4. 035-78, устатковані світлофільтрами типу Э-2, Э-3 за ДСТ 12.4. 080-79.

Для зниження звуку в стаціонарних умовах роботи з напилювання варто працювати в закритих кабінах, облицьованих вогнестійкими звуковбирними матеріалами.

Як індивідуальні засоби захисту органів слуху металізаторів рекомендується застосовувати протишумові навушники, каски противошумні та антифони-вкладиші за ДСТ 12.4. 051-78.

Як індивідуальні засоби захисту органів дихання необхідно застосовувати респіратори за ДСТ 12.4. 028-76 (в умовах високої запиленості – маски з примусовою подачею повітря).

Ділянка напилювання повинна розміщатися в ізольованих приміщеннях, як правило, на першому поверсі. Розміщення металізаційних ділянок у підвальних приміщеннях забороняється. Приміщення повинно бути з природним або штучним освітленням, мати форму, що виключає утворення застійних зон, у яких може накопичуватися пил, аерозолі та гази. Стіни та підлога повинні бути оброблені звукопоглинаючим матеріалом; матеріал покриття підлоги не повинен ускладнювати вологе збирання. Штучне висвітлення бажано люмінесцентне. Освітленість – не менш 200 лк; висота стін 3,4 м.

Приміщення повинно бути забезпечене вуглекислотними вогнегасниками марок ОУ-2 і ОУ-8 [2].

Установка устаткування, підведення комунікацій повинні відповідати “Правилам технічної експлуатації електроустановок споживачами й правилами техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачем”; транспортування, зберігання й експлуатація балонів з робочим газом –

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

“Правилам розташування та безпечної експлуатації ємностей, що перебувають під тиском”.

Транспортування, зберігання й експлуатація балонів з робочими газами повинні відповідати "Правилам розташування та безпечної експлуатації ємностей, що перебувають під тиском".

Рампу для балонів з робочими газами розміщують за приміщенням.

Джерела комунікацій повинні бути винесені з робочих приміщень, а пульти керування – перебувати на робочих місцях.

### **Висновки.**

1. Розглянуто питання охорони праці і охорони навколишнього середовища з урахуванням розроблених технологічних рекомендацій щодо нанесення електродугових покриттів модернізованим розпилювачем

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

## 6 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НАНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ РОЗРОБЛЕНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ

Перспективним напрямком підвищення терміну служби виробів є утворення поверхневого шару, що контактує з зовнішнім середовищем, із поліпшеними властивостями. Одним з інтенсивно розвинутих напрямків є газотермічне напилювання (ГТН) покриттів: газополуменеве, плазмове, детонаційне, електродугова металізація. При ГТН поверхня деталі, на яку наноситься покриття, нагрівається нижче температури відпуску. Тому для процесів ГТН характерні малі теплові деформації та в багатьох випадках відсутність структурних змін у деталі. Це обумовлює ефективність ГТН-методів для поліпшення експлуатаційних характеристик виробу.

Результати аналізу [10], виконаного консалтинговою фірмою The Technical Center for Mechanical Engineers (CETIM) (Франція), показують, що світовий обсяг ринку технологій ГТН в 2000 р. склав 1600 млн. євро, а ріст у наступне десятиліття складе 25 %

Електродугове напилювання переважніше інших способів напилювання за такими показниками, як теплова ефективність, вартість напилюваних матеріалів, простота обслуговування. Витрата електроенергії на 1 кг матеріалу, що розпорошує, при електродуговому напилюванні становить приблизно 0,6 кВт/кг. При плазмовому напилюванні енергетичні витрати становлять 5...7 кВт/кг для порошкового напилювання, 2...3 кВт/кг для дротового напилювання. Згідно з аналізом джерел інформації відносна вартість електродугових покриттів у 3...10 разів дешевше покриттів, отриманих іншими методами газотермічного напилювання при забезпеченні їхньої високої міцності [3].

У даній дипломній роботі виконано розрахунок технологічної собівартості виробництва сталевих електродугових покриттів з дроту марки 65Г.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

## 6.1 Вхідні дані

Вхідні дані наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Вхідні дані для проведення розрахунку

| Найменування показників            | Одиниці виміру | Значення |
|------------------------------------|----------------|----------|
| Річний обсяг продукції             | шт.            | 2000     |
| Дріт марки 65Г діаметром 1,2 мм    | грн.           | 15       |
| Потужність устаткування:           |                |          |
| - струменево-абразивної обробки    | кВт            | 7        |
| - електродугової установки КДМ-2   | кВт            | 25       |
| - токарський верстат типу ІК-62    | кВт            | 11       |
| - компресор СБ4/3-50АВ.360         | кВт            | 2,2      |
| Ціна за 1 кВт/год                  | грн.           | 0,2436   |
| Рівень додаткової заробітної плати | %              | 36,67    |
| Норма амортизації                  | %              | 40       |
| Норма витрати на поточний ремонт   | %              | 5        |

## 6.2 Розрахунок зміни собівартості

Розрахунок зміни собівартості проводять на річний обсяг продукції за всіма статтями витрат, які підлягають зміні в результаті нового технологічного процесу.

Розрахунок робиться за наступними статтями витрат:

- матеріал робітника шару;
- витрати на електроенергію;
- основна заробітна плата;
- додаткова заробітна плата;
- відрахування від заробітної плати;
- амортизаційні витрати;

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

- витрати на поточний ремонт.

### 6.3 Розрахунок одночасних витрат на впровадження сталевих покриттів, отриманих електродуговим методом

До одночасних витрат відносяться:

– додаткове оснащення, яке необхідно для впровадження нової технології.

Вартість додаткового устаткування наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Найменування й вартість додаткового оснащення

| Найменування устаткування                                 | Одиниці виміру | Ціна однієї установки | Кількість установок | Ціна установки |
|-----------------------------------------------------------|----------------|-----------------------|---------------------|----------------|
| Установка для струменево-абразивної обробки               | грн.           | 13800                 | 1                   | 13800          |
| Установка для електродугового напилювання покриттів КДМ-2 | грн.           | 15000                 | 1                   | 15000          |
| Токарний верстат типу ІК-62                               | грн.           | 22000                 | 1                   | 22000          |
| Компресор СБ4/3-50АВ.360                                  | грн.           | 3000                  | 1                   | 3000           |

Витрати на покупку устаткування складають:

$13800 + 15000 + 22000 + 3000 = 53800$  грн.

### 6.4 Розрахунок технологічної собівартості

Технологічна собівартість містить у собі витрати на основні матеріали, електроенергію, амортизацію, основну та додаткову заробітну плату, нарахування на основну й додаткову заробітну плату.

Вартість основних матеріалів наведено в таблиці 6.3.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

Таблиця 6.3 – Вартість матеріалів

| Найменування матеріалів | Маса матеріалу на один виріб, кг | Річна програма, шт. | Маса матеріалу для виготовлення річної програми, кг | Ціна 1 кг матеріалу, грн. | Ціна матеріалу на виготовлення річної програми, грн. |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|
| Дріт 65Г<br>Ø1,2 мм     | 0,8                              | 2000                | 1600                                                | 15                        | 24000                                                |

Витрати матеріалів за рік становлять 24000 грн.

#### 6.4.1 Розрахунок заробітної плати основним робітникам

На ділянці для електродугового напильовання покриттів установлена почасово-преміальна система оплати. Розрахунок річної суми тарифної заробітної плати при цій системі наведений у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Розрахунок основної заробітної плати

| Необхідний персонал                    | Розряд | Кількість працівників | Почасовий тариф грн. | Робочих годин у році | ЗП на одного працівника грн. | Річна заробітна плата на робітників грн. |
|----------------------------------------|--------|-----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------------------|
| Інженер – технолог                     | 2      | 1                     | 6,262                | 910                  | 5698,42                      | 5698,42                                  |
| Оператор                               | 5      | 2                     | 9,677                | 1820                 | 17612,14                     | 35224,28                                 |
| Технік з налагоджувальник устаткування | 4      | 1                     | 7,211                | 910                  | 6562,01                      | 6562,01                                  |
| Підсобний робітник                     | 2      | 1                     | 5,288                | 1820                 | 9624,16                      | 9624,16                                  |

Витрати на заробітну плату складають:

$$5698,42 + 35224,28 + 6562,01 + 9624,16 = 57108,87 \text{ грн.}$$

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

#### 6.4.2 Розрахунок витрат на основну й додаткову заробітну плату

Розрахунок витрат основної й додаткової заробітної плати, наведений у таблиці 6.5 згідно з формулою:

$$\text{Додаткова ЗП} = \frac{\text{Основний фонд ЗП}}{250} \cdot 24 \text{ дні.}$$

Таблиця 6.5 – Розрахунок витрат на основну й додаткову заробітну плату

| Сума витрат на основну заробітну плату, грн. | Сума витрат на додаткову заробітну плату, грн. |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 57108,87                                     | 5482                                           |

Відрахування від заробітної плати складають 5482 (грн).

#### 6.4.3 Розрахунок відрахувань від заробітної плати

Таблиця 6.6 – Розрахунок відрахувань на заробітну плату

| Сума витрат на основну та додаткову ЗП, грн | Рівень відрахувань, % | Сума відрахувань, грн |
|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 62590                                       | 37,5                  | 23471                 |

Відрахування на заробітну плату становлять 23471 грн.

#### 6.4.4 Розрахунок витрат на амортизацію

Таблиця 6.7 – Витрати на амортизацію

| Найменування устаткування                   | Кількість установок, шт. | Первинна ціна, грн. | Норма амортизації, % | Сума витрат на амортизацію, грн. |
|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|
| Установка для струменево-абразивної обробки | 1                        | 13800               | 40                   | 5520                             |
| Установка електродугового напилювання КДМ-2 | 1                        | 15000               | 40                   | 6000                             |
| Токарний верстат типу ІК-62                 | 1                        | 22000               | 40                   | 8800                             |
| Компресор СБ4/3-50АВ.360                    | 1                        | 3000                | 40                   | 1200                             |

Витрати на амортизацію становлять:  
 $5520 + 6000 + 8800 + 1200 = 21520$  грн.

#### 6.4.5 Розрахунок витрат на потоковий ремонт

Таблиця 6.8 – Розрахунок витрат на потоковий ремонт

| Найменування<br>встаткування                         | Первинна<br>ціна, грн. | Кількість<br>установок,<br>шт. | Норма<br>витрат на<br>ремонт, % | Сума витрат<br>на ремонт,<br>грн. |
|------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Установка для<br>струйно-<br>абразивної<br>обробки   | 13800                  | 1                              | 5                               | 690                               |
| Установка<br>електродугового<br>напилювання<br>КДМ-2 | 15000                  | 1                              | 5                               | 750                               |
| Токарський<br>верстат типу ІК-62                     | 22000                  | 1                              | 5                               | 1100                              |
| Компресор<br>СБ4/3-50АВ.360                          | 3000                   | 1                              | 5                               | 150                               |

З розрахунку видно, що на ремонт устаткування необхідно  
 $690 + 750 + 1100 + 150 = 2690$  грн.

### 6.4.6 Розрахунок витрат на електроенергію

Таблиця 6.9 – Витрати на електроенергію

| Найменування споживача електроенергії       | Одиниці виміру | Витрати на одиницю устаткування | Кількість устаткування | Тривалість включення за зміну, година | Витрати в добу          | Ціна електроенергії за добу, грн. | Витрати на річну програму, грн. |
|---------------------------------------------|----------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1                                           | 2              | 3                               | 4                      | 5                                     | $6 = 3 \cdot 4 \cdot 5$ | $7 = 6 \cdot 0,24$                | $8 = 7 \cdot 250$               |
| Установка для струменево-абразивної обробки | кВт            | 7                               | 1                      | 1,5                                   | 10,5                    | 2,52                              | 630                             |
| Установка електродугового напилювання КДМ-2 | кВт            | 25                              | 1                      | 1,5                                   | 37,5                    | 9                                 | 2250                            |
| Токарський верстат типу ІК-62               | кВт            | 11                              | 1                      | 1,5                                   | 16,5                    | 3,96                              | 990                             |
| Компресор СБ4/3-50АВ.360                    | кВт            | 2,2                             | 1                      | 4                                     | 8,8                     | 2,112                             | 528                             |

Загальні витрати на електроенергію становлять:

$$630 + 2250 + 990 + 528 = 4398 \text{ (грн)}$$

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

## 6.5 Техніко-економічні показники нанесення покриттів електродуговим методом

Таблиця 6.10 – Технологічна собівартість продукції

| № п.п.                                                 | Найменування статей витрат                                     | Витрати на річну програму, грн. | Витрати на одиницю виробу, грн. |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1                                                      | Використовувані матеріали: дріт марки 65Г $\varnothing$ 1,2 мм | 2400                            | 4,2                             |
| 2                                                      | Устаткування                                                   | 53800                           | 26,9                            |
| 3                                                      | Електроенергія                                                 | 4398                            | 2,199                           |
| 4                                                      | Основна заробітна плата                                        | 57108,87                        | 28,55                           |
| 5                                                      | Додаткова заробітна плата                                      | 5482                            | 2,74                            |
| 6                                                      | Відрахування від заробітної плати                              | 23471                           | 11,74                           |
| 7                                                      | Витрати на амортизацію                                         | 21520                           | 10,76                           |
| 8                                                      | Витрати на потоковий ремонт                                    | 2690                            | 1,35                            |
| <b>Собівартість сталевго покриття з дроту 65Г, грн</b> |                                                                |                                 |                                 |
| Покриття 65Г                                           |                                                                | 88,45                           |                                 |

Собівартість зносостійкого електродугового покриття з дроту марки 65Г складає 88,45 грн.

Економічний ефект від створення сталевго зносостійкого електродугового покриття з урахуванням розроблених рекомендацій складатиме 82,26 гривні для однієї деталі.

$$E_p = 82,26 \cdot 2000 = 164520 \text{ грн.}$$

Термін окупності капіталовкладень складатиме:

$$T = \frac{53800}{164520} = 0,33 \text{ роки.}$$

В ході розрахункової роботи проведено дослідження технологічної собівартості виготовлення сталевго електродугового покриття з дроту марки 65Г напиленого на шток гідроциліндру з урахуванням річної програми (2000 штук). Результати обчислень порівняно з вартістю плазмового зносостійкого покриття. Економічна ефективність складає 82,26 гривні для однієї деталі.

### **Висновки.**

1. Собівартість зносостійкого електродугового покриття з дроту марки 65Г складає 88,45 грн.

2. Економічний ефект від створення сталевого зносостійкого електродугового покриття з урахуванням розроблених рекомендацій складатиме 82,26 гривні для однієї деталі.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. У результаті аналізу науково-технічної літератури стосовно сучасного стану та шляхів розвитку електродугового методу нанесення покриттів встановлено, що перспективним напрямом підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей сталевих покриттів є забезпечення високих енергетичних параметрів напилюваних частинок, зменшення їх розмірів і ступеня окиснення.

2. На основі розрахункових даних, аналізу конструктивних та технологічних параметрів напилення електродугових покриттів встановлено можливість підвищення якості сталевих покриттів за рахунок модернізації ковпака розпилюючої голівки апарату ЕМ-14М. Модернізація дозволила збільшити енергетичні параметри напилюваних частинок та зменшити їх розмір і ступінь окиснення, підвищити коефіцієнт використання матеріалу.

3. Досліджено гранулометричний склад частинок отриманих розпиленням у воду дротів виготовлених зі сталі марки 65Г. Встановлено, що при використанні модернізованого електродугового розпилювача середній діаметр часток зменшується у 1,5 рази в порівнянні зі штатним розпилювачем.

4. У результаті визначення швидкості частинок у високотемпературному струмені при напилюванні модернізованим електродуговим розпилювачем встановлено підвищення їх підлітної швидкості на 21% в порівнянні зі штатним розпилювачем.

5. У результаті дослідження мікроструктури електродугового покриття встановлено зменшення пористості на 44 % та збільшення ступеня деформації сталевих частинок майже у 2 рази за рахунок зменшення їх розміру і збільшення швидкості у високотемпературному струмінні.

6. Встановлено, що при використанні модернізованого електродугового розпилювача та в якості розпилюючого газу суміші стисненого повітря з

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

пропаном міцність зчеплення покриттів з основою зростає на 30%, твердість на 12%, зносостійкість збільшується в 1,4 рази.

7. Розроблені технологічні рекомендації щодо процесу напилення сталевих електродугових покриттів із сталі марки 65Г модернізованим розпилювачем ЕМ-14М, що дозволило підвищити фізико-механічні та експлуатаційні властивості покриттів.

8. Розглянуто питання охорони праці і охорони навколишнього середовища з урахуванням розроблених технологічних рекомендацій щодо нанесення електродугових покриттів модернізованим розпилювачем, розрахована економічна ефективність даної розробки.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. и др. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
2. Аппарат ручной электродуговой повышенной надежности. Паспорт 36 4552 1402 ПС.
3. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник. – К.: “Наукова думка”, 1987. – 544 с.
4. Виробниче освітлення та його розрахунок: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2001. – 84 с.
5. Горелик С.С., «Рекристаллизация металлов и сплавов», - М.: - «Металлургия». 1967. – 404 с.
6. Денесенко Г. Ф. “Охрана окружающей среды в металлургии”. Металлургия, 1989. – 120 с.
7. Дубовий О. М., Степанчук А. М. Технологія напилення покриттів: Підручник. – Миколаїв: НУК, 2007. - 236 с.
8. Дубовой А. Н., Карпеченко А. А., «Электродуговое напыление композиционных покрытий», Сварка и родственные технологии в третье тысячелетие: Тез. стенд, докл. / Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. - Киев, 2008. – 236 с.
9. Дубовой А. Н., Картченко А. А., «Исследование возможности напыления композиционного покрытия электродуговым методом», Збірник наукових праць НУК. - Миколаїв: НУК, 2007. - № 5 (416). – 152с.
10. Калита В. И., Физика, химия и механика формирования покрытий, упрочненных наноразмерными фазами, Физика и химия обработки материалов, 2005 № 4, С. 46-57.

|     |       |             |        |      |                                                                                                   |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|     |       |             |        |      | <div style="text-align: center; font-size: 1.2em; font-weight: bold;">КР.131.5121з.01.00.ПЗ</div> | Лист |
|     |       |             |        |      |                                                                                                   |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                                                                                                   |      |

11. Катц Н. В., Антошин Е. В., Вадивасов Д. Г. и др., «Металлизация распылением». – М.: «Машиностроение», 1966. – 198 с.
12. Коробов Ю. С., Луканин В. Л., Прядко А. С., Изоитко В. Л., Преимущества активированной дуговой металлизации, Уральский институт сварки, Уралтрансаш (Екатеринбург), Сварщик на Урале № 2 (24), 2002г, С. 16.
13. Коробов Ю. С., Уральский государственный технический университет – УПИ (Екатеринбург), Эффективность применения активированной дуговой металлизации для нанесения защитных покрытий, Сварочное производство, 2005. - № 2, С. 47-49.
14. Куракова Н. В., Молоканов В. В., Калита В. И., Комлев Д. И., Умнов П. П., Формирование плазменных покрытий с нано и аморфной структурой, Физика и химия обработки материалов 2008, №4, С.36-39.
15. Пат. 43984 Україна МПК (2009) С23С 4/00. Спосіб нанесення електродугових покриттів [Текст] / О. М. Дубовий, Т. А. Янковець, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов; заявник и патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № у 2009 03877, заявл. 21.04.2009; опубл. 10.09.2009, бюл. № 17.
16. Пат. 83603 Україна МПК (2006) С23С 4/00. Пристрій для електродугового напилення [Текст] / О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, С. М. Шумов; заявник и патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № у 2007 07157, заявл. 25.06.2007; опубл. 25.07.2008, бюл. № 14.
17. Сергеев В. В., инж., Спиридонов Ю. Л., инж., Фарахшин И. И., инж. НПК ЗАО "ЮНА" (Казань), Восстановление коленчатых валов отечественных и зарубежных дизельных двигателей электродуговой металлизацией, Сварочное производство, 2004. № 2.
18. Скороход В. В., Уварова І. В., Рагуля А. В., Фізико-хімічна кінетика в наноструктурних системах. - Київ: Академперіодика, 2001. - 180 с.

|     |       |             |        |      |                       |      |
|-----|-------|-------------|--------|------|-----------------------|------|
|     |       |             |        |      | КР.131.5121з.01.00.ПЗ | Лист |
|     |       |             |        |      |                       |      |
| Зм. | Аркуш | № документа | Підпис | Дата |                       |      |

