

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

На правах рукопису

КУСТОВ ВІКТОР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.91:621.793.7:621.9.048

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ФОРМУВАННЯМ
КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ КОМПЛЕКСНИМ МЕТОДОМ**

05.02.08 – Технологія машинобудування

Дисертація

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник
кандидат технічних наук,
ст. наук. співробітник, доцент
Роп'як Любомир Ярославович

Івано-Франківськ, 2015

ЗМІСТ

| | |
|---|-----------|
| ВСТУП..... | 6 |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ | |
| ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ..... | 13 |
| 1.1 Аналіз умов роботи деталей бурового і нафтогазопромислового обладнання та причин виходу їх з ладу | 13 |
| 1.2 Сучасні технологічні процеси формування композиційних покриттів | 16 |
| 1.3 Механічна обробка покриттів та визначення припусків на їх обробку | 33 |
| 1.4 Висновки до розділу | 35 |
| РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ | |
| ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ | |
| КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ КОМПЛЕКСНИМ МЕТОДОМ..... | |
| 36 | |
| 2.1 Дослідження руху та нагрівання частинок порошку в процесі напилення композиційних покриттів електродуговим методом..... | 36 |
| 2.2 Ймовірно-математичне дослідження процесу формування покриття при віброелектроіскровому легуванні..... | 52 |
| 2.3 Висновки до розділу | 56 |
| РОЗДІЛ 3 ВИБІР МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕНЬ, РОЗРОБКА | |
| ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ | |
| ПОКРИТТІВ КОМПЛЕКСНИМ МЕТОДОМ | |
| 57 | |
| 3.1 Вибір матеріалів, металорізального обладнання, різальних інструментів і вимірювальних приладів | 57 |
| 3.1.1 Досліджувані матеріали | 57 |
| 3.1.2 Металорізальне обладнання, різальний інструмент і вимірювальні прилади | 59 |
| 3.2 Методики дослідження властивостей та будови композиційних покриттів | 61 |
| 3.2.1 Методи випробовування покриттів на зношування | 61 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2.2 | Методика електрохімічних досліджень і визначення рівня допустимих напружень в зразках з покриттями | 63 |
| 3.2.3 | Методика визначення мікротвердості | 64 |
| 3.2.4 | Методика визначення міцності зчеплення покриття з основою..... | 65 |
| 3.2.5 | Методика визначення залишкових напружень в покриттях | 66 |
| 3.2.6 | Дослідження мікроструктури покриттів | 68 |
| 3.3. | Розробка та модернізація обладнання для формування композиційних покриттів | 68 |
| 3.3.1 | Розробка установки для напилення композиційних покриттів електродуговим методом із суцільних дротів та порошків | 68 |
| 3.3.2 | Модернізація установки для віброелектроіскрового легування | 79 |
| 3.4 | Розробка групового технологічного процесу формування композиційних покриттів комплексним методом | 82 |
| 3.5 | Методика обробки результатів технологічних досліджень і планування експерименту | 85 |
| 3.5.1 | Математична обробка результатів дослідження шорсткості обробленої поверхні покриттів | 85 |
| 3.5.2 | Планування технологічних експериментів | 85 |
| 3.6. | Висновки до розділу | 86 |

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ КОМПЛЕКСНИМ МЕТОДОМ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Технологічне обґрунтування складу композиційних покриттів і вплив технологічних параметрів процесу електродугового напилення композиційних покриттів на їх властивості | 87 |
|-----|--|----|

| | |
|--|------------|
| 4.2 Вплив технологічних параметрів віброелектроіскрового легування на показники композиційних покриттів, сформованих комплексним методом | 107 |
| 4.3 Аналіз точності токарної обробки зовнішньої циліндричної поверхні втулок з покриттями | 116 |
| 4.4 Дослідження шорсткості поверхні композиційних покриттів, обробленої різанням..... | 122 |
| 4.5 Висновки до розділу | 128 |
| РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ | |
| ДОСЛІДЖЕНЬ | 130 |
| 5.1 Інженерна методика розрахунку товщини та припусків на механічну обробку деталей з композиційними покриттями, сформованими комплексним методом | 130 |
| 5.2 Розробка технології та дослідно-промислової установки для формування композиційних покриттів комплексним методом на деталях типу тіл обертання..... | 134 |
| 5.2.1 Формування композиційних покриттів на зовнішній циліндричній поверхні деталей бурових замків | 138 |
| 5.2.2 Формування композиційних покриттів на зовнішній циліндричній поверхні захисних втулок валів | 142 |
| 5.3 Розробка технології віброелектроіскрового легування нікелем гранул карбіду вольфраму, які застосовують для зміцнення породоруйнівних елементів бурових доліт | 143 |
| 5.3.1 Технологічний процес віброелектроіскрового легування нікелем гранул карбіду вольфраму..... | 143 |
| 5.3.2 Поверхнєве армування робочих поверхонь зубців бурових доліт легованими гранулами карбіду вольфраму..... | 145 |
| 5.4 Практичне застосування технології формування композиційних покриттів комплексним методом і розробленого обладнання | 146 |
| 5.5 Висновки до розділу | 148 |

| | |
|--|-----|
| ВИСНОВКИ | 149 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 152 |
| ДОДАТКИ | 168 |
| Додаток А Авторські свідоцтва на винаходи та патенти..... | 169 |
| Додаток Б Застосування регресійного аналізу для дослідження шорсткості обробленої поверхні покритті | 176 |
| Додаток В Розрахунок складових загальної похибки обробки | 179 |
| Додаток Г Креслення деталей та оправок в | 185 |
| Додаток Д Аналіз шкідливих чинників при напиленні | 188 |
| Додаток Е Застосування легованих гранул карбіду вольфраму для об'ємного армування породоруйнівних елементів бурових доліт | 191 |
| Додаток Ж Поверхні відгуку | 195 |
| Додаток З. Акти впровадження результатів роботи..... | 200 |

ВСТУП

Актуальність теми. У машинобудуванні як в Україні так і за кордоном, за останні роки склалась тенденція до широкого використання композиційних покриттів для підвищення надійності та довговічності деталей машин. Для деталей бурового і нафтогазопромислового обладнання, яке експлуатується в складних умовах, характерним є значна втрата лінійних розмірів у результаті зношування, тому в процесі їх виготовлення або відновлення застосовують газотермічні покриття. Отримання покриттів електродуговою металізацією є технологічно більш простим, дешевим і високопродуктивним, проте застосування суцільних дротів як електродних матеріалів не забезпечує одержання широкої гами композиційних покриттів необхідного складу з потрібними характеристиками та обмежує область застосування цього методу. Використання порошкових дротів дає можливість одержувати різноманітні композиційні покриття з високою зносостійкістю. Однак їх складно обробляти різанням, в процесі якого частина високовартісного шару покриття переходить в стружку. Подальшим кроком до створення зносостійких композиційних покриттів електродуговим напиленням може бути комплексне поєднання його з іншими методами поверхневого зміцнення. Великі можливості в цьому напрямку відкриває комбінація електродугового напилення та віброелектроіскрового легування. За рахунок сполучення в даному комплексному методі механізмів зміцнення різної природи – напилення та поверхневого легування – забезпечує формування композиційного покриття з покращеними властивостями, тому розроблення комплексного методу формування композиційних покриттів для підвищення якості поверхонь деталей є актуальним і має важливе як наукове так і практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до тематичного плану науково-дослідних робіт Івано-Франківського національного технічного університету

нафти і газу (ІФНТУНГ), є складовою частиною наукової тематики кафедри технології нафтогазового машинобудування ІФНТУНГ і базується на результатах держбюджетних тем: «Науково-прикладні основи розробки технологічного забезпечення виробництва та надійності нафтогазового і металорізального обладнання» (2010–2015 рр.) і «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» на 2011–2016 рр. (номер державної реєстрації 0111U005890).

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є розроблення комплексного методу формування якості поверхонь деталей типу тіл обертання в процесі виготовлення для підвищення їх експлуатаційних властивостей з одночасним зниженням затрат на зміцнення.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз умов роботи деталей типу тіл обертання бурового і нафтогазопромислового обладнання, існуючих технологічних процесів, конструкцій технологічного обладнання для зміцнення і обґрунтувати доцільність використання комплексного методу, який базується на комбінації технології електродугового напилення композиційних покриттів і віброелектроіскрового легування.

2. Розробити математичну модель процесу електродугового напилення композиційних покриттів із матеріалу суцільних дротів і частинок порошку, які вводять із живильника в металоповітряний потік, дослідити параметри руху і температуру частинок порошку для забезпечення формування композиційних покриттів та ймовірно-математичну модель процесу віброелектроіскрового легування.

3. Розробити ефективний груповий технологічний процес формування композиційних покриттів поєднанням електродугового напилення та віброелектроіскрового легування, спроектувати і виготовити функціонально придатне лабораторне технологічне обладнання та оснащення і систему автоматизованого керування технологічними параметрами.

4. Дослідити вплив технологічних параметрів процесу формування композиційних покриттів комплексним методом на показники якості зміцнених поверхонь, оцінити точність механічної обробки деталей з покриттями та їх шорсткість.

5. Оцінити електрохімічним методом роботоздатність композиційних покриттів за різних видів навантаження.

6. Експериментально дослідити вплив параметрів технологічного процесу зміцнення комплексним методом на експлуатаційні властивості деталей типу тіл обертання.

7. Розробити конструкцію і виготовити дослідно-промислову установку для формування композиційних покриттів комплексним методом, провести стендові та промислові випробовування деталей і впровадити результати досліджень у виробництво та навчальний процес.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення деталей типу тіл обертання зі зміцненням комплексним методом їх робочих поверхонь поєднанням електродугового напилення та віброелектроіскрового легування.

Предмет дослідження – зміцнення зовнішніх циліндричних поверхонь деталей типу тіл обертання електродуговим напиленням композиційного покриття та віброелектроіскровим легуванням і технологічне забезпечення показників якості наступною механічною обробкою.

Методи дослідження. В основу досліджень покладено фундаментальні засади технології машинобудування, теорії різання, механіки, а також математичне і комп'ютерне моделювання. Результати експериментальних досліджень одержано за допомогою спеціально розробленого технологічного обладнання та оснащення, а також з використанням сучасних методик металографії, мікроелектрохімічних досліджень, випробовувань на зношування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у подальшому розвитку науково-прикладних основ технологічних процесів формування композиційних покриттів комплексним методом. При цьому:

– набуло подальшого розвитку теоретичне обґрунтування заміни порошкових дротів на суцільні з введенням частинок порошку із живильника в металоповітряний потік при електродуговому напиленні композиційних покриттів;

– вперше розроблено математичну модель процесу електродугового напилення композиційних покриттів із матеріалу суцільних дротів та частинок порошку, які вводять із живильника у металоповітряний потік, що дозволило визначити технологічні параметри для забезпечення нагрівання та потрапляння частинок порошку в центр зони напилення;

– вперше розроблено комплексний метод поверхневого зміцнення деталей машин, згідно з яким шляхом поєднання електродугового напилення та віброелектроіскрового легування формують композиційні покриття із заданими експлуатаційними властивостями;

– вперше встановлено, що при точінні напилених покриттів із суцільних дротів за певної глибини зрізаного шару отримується оброблена поверхня з мінімальною шорсткістю, розміщення якої залежить від загальної товщини покриття. Вказана особливість характерна і для двошарових покриттів, що складаються з робочого композиційного шару, напиленого із матеріалу дротів і порошоків, та верхнього технологічного шару із матеріалу дротів, який піддається механічній обробці. Поверхня з мінімальною шорсткістю для цих покриттів розташована ближче до зовнішньої поверхні, ніж для одношарових;

– експериментально обґрунтовано вплив технологічних параметрів формування композиційних покриттів комплексним методом на зміну геометричних розмірів і шорсткості поверхні деталей.

Практичне значення одержаних результатів. На основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено і впроваджено технологічні процеси виготовлення нових і відновлення зношених деталей машин комплексним методом, який поєднує електродугове напилення покриттів з суцільних дротів і частинок порошку, які вводять із живильника в металоповітряний потік, та віброелектроіскрове легування, що вирішує питання

підвищення якості поверхонь та зниження затрат на зміцнення. Модернізовано установку для віброелектроіскрового легування, розроблено конструкції:

– установки для електродугового напилення композиційних покриттів з подачею частинок порошку в металоповітряний потік із живильника з системою автоматизованого керування технологічними параметрами процесу;

– дослідно-промислової установки для формування композиційних покриттів комплексним методом.

Розроблено технологічний процес віброелектроіскрового легування нікелем гранул твердого сплаву, який використовується для формування зносостійких породоруйнівних елементів бурових доліт.

Технічну новизну розробок захищено 3-ма авторськими свідоцтвами та 3-ма патентами на винаходи.

Розроблену технологію формування композиційних покриттів комплексним методом на деталях типу тіл обертання передано і впроваджено у виробництво в ТзОВ МНВЦ «Епсілон ЛТД» і ТзОВ «Нафтогазтехнологія» (м. Івано-Франківськ). За результатами стендових випробовувань захисних втулок валів відцентрових насосів встановлено підвищення їх ресурсу роботи в 1,5 рази порівняно із серійними. Промислові випробовування бурових замків показали підвищення терміну експлуатації в 1,4 рази порівняно із серійними.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі для підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня спеціаліст за спеціальністю 7.05050201 – «Технології машинобудування» під час викладання дисциплін «Технологія машинобудування», «Технологічні методи зміцнення», «Обладнання і транспорт механообробних цехів» в Інституті інженерної механіки ІФНТУНГ.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати роботи опубліковано автором в [1 – 28], з них самотійно [2, 5]. Здобувачем розроблено комплексний метод формування композиційних покриттів для підвищення якості поверхонь деталей. У працях, що написані у співавторстві, авторові належить: експериментальне дослідження рівня шуму при електродуговому

напиленні [1], теоретичне дослідження зміни швидкості при напиленні композиційних покриттів [3], теоретичне дослідження впливу співвідношення площі одиничного розряду до площі поверхні, яка зміцнюється [4], формулювання розрахункової схеми для визначення швидкостей частинок порошку [6], постановка задачі та дослідження впливу технологічних параметрів віброелектроіскрового легування на зміну розмірів зразків і шорсткості їх поверхні [7], обґрунтування вибору армуючих гранул і проведення математичного планування експерименту [9]. Постановка задач, аналіз та обговорення результатів досліджень проведено спільно з науковим керівником та частково із співавторами публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи були заслухані, обговорені та отримали схвалення на: Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми і шляхи енергозабезпечення України» (м. Івано-Франківськ, 1993 р.), Конф. професорсько-викладацького складу інституту нафти і газу (м. Івано-Франківськ, 1996 р.), VII Міжн. наук.-практ. конф. «Наука і освіта '2004'», (м. Дніпропетровськ, 2004 р.), Міжнар. наук.-техн. конф. «Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці «ІФНТУНГ-40»» (м. Івано-Франківськ, 2007 р.), V Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Київ, 2010 р.), Міжн. наук.-техн. конф. «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» (м. Тернопіль, 2010 р.), VII Междунар. науч.-техн. конф. «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» (г. Новополоцк, 2011 р.), XII Всеукр. молод. наук.-техн. конф. «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (м. Київ, 2012 р.), Виставці «Інтелектуальний продукт вчених, винахідників і раціоналізаторів Прикарпаття» (м. Івано-Франківськ, 2011 р.), III Всеукр. наук.-техн. конф. «Прогресивні технології в машинобудуванні» (м. Львів, 2015 р.). У повному обсязі робота доповідалась і отримала позитивний відгук на розширених наукових семінарах кафедр технології нафтогазового машинобудування і комп'ютеризованого машинобудівного виробництва ІФНТУНГ (2015 р.), розширеному науково-технічному семінарі

Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (2015 р.) та науково-технічному семінарі кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (2015 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 28 наукових праць, серед них: 9 статей у провідних фахових виданнях, два з яких входять до міжнародних наукометричних баз даних: «Ulrich's Web Global Serials Directory», «eLibrary», «Index Copernicus», «Polisch Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor», «Scientific Indexing Services»; «Scopus», 3 авторських свідоцтва, 1 деклараційний патент, 1 патент на винахід, 1 патент на корисну модель, 1 авторське право на комп'ютерну програму, 12 тез Всеукраїнських і міжнародних наук.-техн. конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел, який налічує 147 найменувань, та додатків. Загальний обсяг роботи становить 167 сторінок, в тому числі 51 рисунок, 14 таблиць і 8 додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

1.1. Аналіз умов роботи деталей бурового і нафтогазопромислового обладнання та причин виходу їх з ладу

Основна більшість деталей та вузлів обладнання в нафтовій і газовій промисловості працює при різних видах навантаження в агресивних середовищах, які у своєму складі містять абразивні частинки гірської породи.

Бурові замки. Особливо у важких умовах працює колона бурильних труб, яка являє собою набір труб, з'єднаних бурильними замками, і зв'язує долото з наземним обладнанням. Колона бурильних труб слугує для передачі крутного моменту, створення осьового навантаження, надання обертання долоту, а також для подачі бурового розчину під великим тиском через внутрішню порожнину труб на вибій свердловини. Бурильні замки мають більший діаметр ніж бурильна труба і контактують із стінкою свердловини та інтенсивно зношуються.

За час експлуатації бурильних труб декілька разів замінюють деталі бурових замків – ніпелі та муфти, що є деталями класу тіл обертання із приєднувальними внутрішніми та зовнішніми конічними різьбами.

Бурові замки зношуються як в процесі роторного та турбінного буріння, так і при виконанні спуско-підймальних операцій. Слід зазначити, що при роторному бурінні бурова колона обертається з більшою кутовою швидкістю, тому бурильні замки зношуються більш інтенсивно.

Зношування бурових замків відбувається по їх зовнішній циліндричній поверхні. Слід зазначити, що більш інтенсивно піддаються зношуванню ті замки, які знаходяться у нижній частині бурової колони та працюють в необсадженої частині свердловини (рис. 1.1).

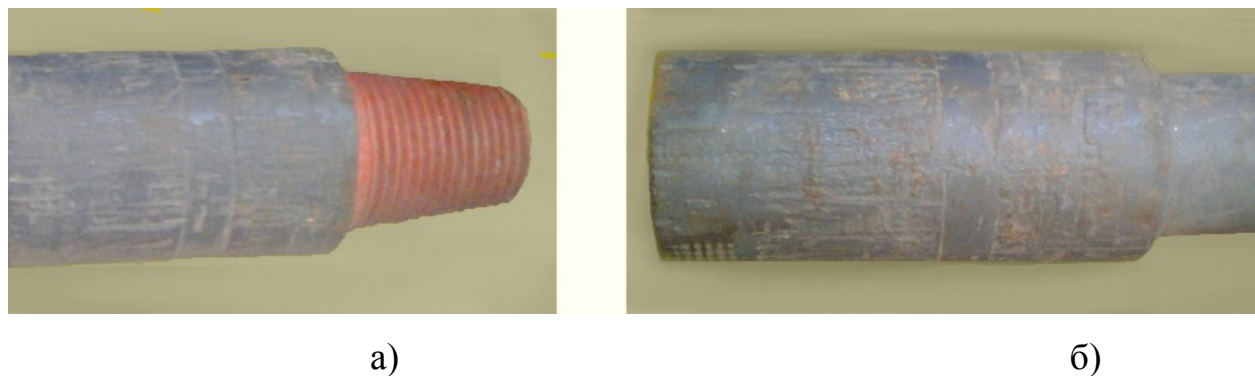


Рис. 1.1. Загальний вигляд зношених деталей бурового замка:

а – ніпель; б – муфта.

Для підвищення зносостійкості бурових замків застосовують різні за характером заходи. Серед них виділяють: експлуатаційні (раціональний вибір складу бурового розчину та застосування мастильних додатків до нього, вибір оптимальних режимів буріння, ретельне очищення бурового розчину від частинок гірської породи); конструкторсько-технологічні (вибір матеріалів, призначення режимів термічної обробки, способи об'ємного та поверхневого зміцнення).

Експлуатаційні методи обмежені в застосуванні, оскільки, наприклад, при очищенні бурового розчину від абразивних частинок гірської породи відбувається втрата обважнювача із розчину, а вибір складу бурового розчину визначається складом геологічної будови свердловини.

Як метод зміцнення найчастіше застосовують наплавлення щонайменше трьох кілець із твердого сплаву (карбіду вольфраму). Твердосплавне наплавлення є достатньо ефективним засобом підвищення зносостійкості бурових замків, але призводить до термічного деформування приєднувальних різьбових частин муфти і ніпеля, а також до інтенсивного зносу труб обсадної колони, заміна яких є дорогавартісною операцією при будівництві свердловин, тому для захисту від зносу деталей бурових замків доцільно застосовувати технологічні методи зміцнення, які підвищують зносостійкість їх циліндричних поверхонь і не призводять до термічних деформацій, а також не спричиняють інтенсивного зношування труб обсадної колони. Такі вимоги можуть

задовільнити газотермічні покриття, зокрема напилена електродуговою металізацією.

Відцентрові насоси. Насоси такого типу широко застосовують при бурінні (підготовка бурових розчинів, їх закачування в поршневі насоси), видобутку нафти (в системах підтримки пластового тиску) та перероблення вуглеводнів на нафтохімічних підприємствах (перекачування води та різних технологічних розчинів). Вказані насоси належать до енергетичних машин і служать для перетворення енергії електродвигуна в гідравлічну енергію потоку рідини і містять: робоче колесо, вал і равликподібний корпус. Робоче колесо кріплять консольно на валу і розташовують у корпусі, який має вхідний осьовий і вихідний тангенційний патрубки. Для запобігання витікання рідини із корпуса насоса зі сторони входу вала встановлюють вузол ущільнення, який складається із стакана (іноді роль стакана може виконувати отвір у кришці корпуса насоса), захисної втулки (грунбуksi), запресованої на вал насоса, м'якої набивки, натискної шайби та кришки, що притискається гайками, які загвинчують на шпильки. Зазвичай застосовують прографічену та промаслену бавовняну набивку. Ступінь герметизації ущільнення регулюють стисканням набивки, яке забезпечується за рахунок переміщення натискної шайби, яка взаємодіє із кришкою, шляхом затягування гайок.

При запуску відцентрового насоса без рідини захисна втулка і вал можуть сильно нагріватися за рахунок тертя в зоні контактування із сальниковою набивкою та інтенсифікувати зношування елементів ущільнення, тому слід запобігати виникненню таких аварійних ситуацій. Термін служби набивки складає 450...650 годин при роботі на чистій воді, а при наявності абразивних частинок різко знижується і досягає 100...180 годин. Після втрати початкової пружності набивку замінюють, а захисну втулку – після зносу шару загартованого струмами високої частоти або й раніше, при виникненні на робочій поверхні задирів, або інших пошкоджень внаслідок тертя (рис. 1.2). Втрата діаметрального розміру робочої поверхні втулки в межах 3 мм (~20 % товщини стінки).



Рис. 1.2. Загальний вигляд зношеної захисної втулки вала відцентрового насоса.

Заміна зношеної втулки вимагає розбирання відцентрового насоса, зняття патрубків, від'єднання вхідного і вихідного робочого колеса, витягування вала, випресовування захисної втулки із вала та її заміна, що призводить до зайвих виробничих витрат.

1.2. Сучасні технологічні процеси формування композиційних покриттів

Методи поверхневого зміцнення робочих поверхонь деталей машин виготовлених зі сталей можна поділити на такі три основні групи:

- зміцнення поверхневих шарів деталей термічною або хіміко-термічною обробкою [29–36];
- об'ємне і поверхневе армуванням робочих поверхонь деталей з використанням зносостійкої твердої складової та металевої матриці [37 – 42];
- нанесення на поверхні деталей захисних покриттів [43–64].

Зміцнення робочих поверхонь деталей виготовлених із сталі, наприклад, термічною обробкою досягається, як відомо, за рахунок структурних перетворень металу шляхом виконання об'ємного чи поверхневого гартування, які включають такі операції:

- нагрівання деталі до встановленої температури;
- витримування деталі при заданому температурному режимі;
- швидке охолодження.

При такій обробці формується поверхня з високими механічними властивостями: твердістю, зносостійкістю, здатністю протистояти значним динамічним навантаженням, що сприяє підвищенню надійності і довговічності, як самої деталі, так і цілого механізму, в склад якого вона входить.

Хіміко-термічну обробку (ХТО) застосовують для поверхневого насичення сталей та покриттів хімічними елементами (наприклад, вуглецем, азотом, бором, фосфором, хромом, алюмінієм тощо) шляхом його дифузії в атомарному стані із зовнішнього середовища при високій температурі [30, 34, 36, 49, 65–69].

ХТО включає такі основні операції:

- нагрівання деталі до визначеної температури в певному середовищі (твердому, газовому, рідинному), з якого поступає насичуючий елемент;
- витримка деталі при заданому температурному режимі;
- охолодження на повітрі або гартування.

Слід відзначити, що ХТО змінює хімічний склад та структуру поверхневих шарів робочої поверхні деталі та надає їй гаму цінних експлуатаційних властивостей, таких як: підвищена зносостійкість, твердість, корозійна стійкість, границя міцності (витривалість), тепло- та жаростійкість тощо.

До недоліків цих методів обробки деталей слід віднести довготривалість процесу, зниження точності, порівняно з отриманою на попередній операції механічної обробки, необхідність, як правило, проектувати наступну операцію механічної обробки для забезпечення показників точності та шорсткості, що призводить до часткового зняття зміцненого шару, виникнення небажаних залишкових напружень та інших дефектів, які знижують міцність деталі.

Основи об'ємного відцентрового армування породоруйнівних елементів бурових доліт закладено у роботах Ю. М. Бугая [37]. Суть методу армування полягає в розташуванні гранул твердого сплаву в об'ємі робочої частини бурових доліт за рахунок переміщення цих гранул під дією відцентрових сил у розтопленій сталі внаслідок більшої питомої ваги карбїду вольфраму порівняно з металом матриці. Розрізняють відцентрове армування з однією вертикальною віссю, горизонтальною віссю, та з двома взаємно перпендикулярними осями

обертання керамічної форми. Це дозволяє раціонально використовувати дороговартісний карбід вольфраму, армуючи лише робочу зону.

Для підвищення зносостійкості зубців бурових доліт застосовують також і поверхневе армування – наплавлення – карбідом вольфраму робочих поверхонь зубців бурових доліт, в т. ч. за різними схемами розташування наплавленого шару [37, 38, 40, 41, 60].

Методи є досить ефективними, але контактування карбіду вольфраму із розтопленою сталлю призводить до його розчинення в ній, зміни властивостей матриці та неефективної витрати дороговартісного карбіду вольфраму, а також аварійної втрати армованого шару у процесі експлуатації бурових доліт. Тому необхідно розробляти методи зниження розчинності гранул карбіду вольфраму в розтопленій сталі, наприклад, шляхом нанесення на їх поверхню захисних нікелевих шарів.

Перспективним є покривання робочих поверхонь деталей матеріалами заданих властивостей. Для цього, в основному, застосовують електрохімічні методи та газотермічні.

Електрохімічними методами наносять хромові, нікелеві та композиційні з використанням нікелевої матриці [35, 46, 49, 67, 70]. Ці покриття дозволяють підвищити зносостійкість деталей, але вони спричиняють наводнення поверхневих шарів металу, вимагають високої технологічної культури.

Методи газотермічного напилення покриттів поширені в промисловості та швидко розвиваються в науковому і технічному плані [35, 36, 51, 53, 58, 66]. Вони ґрунтуються на процесі нагрівання або розтоплення металевих, керамічних та полімерних матеріалів і їх розпилення на поверхні деталей з метою отримання покриттів як з мономатеріалів, так і з композиційних матеріалів.

Джерелом тепла для термічного нагрівання матеріалів, які розпиляють, служить: газокисневе полум'я, електрична дуга, плазмова дуга, детонаційне горіння паливно-кисневої суміші. Менш поширеними способами нагрівання є, наприклад, струми високої частоти, імпульсні електричні розряди.

Розглянемо детальніше основні, за типом джерела нагрівання, способи газотермічного напилення: газополуменеве та високошвидкісне газополуменеве, плазмове, детонаційне, електродугове, як найбільш високоефективні та універсальні.

Сутність методу газополуменевого напилення полягає в нагріванні напилюваного матеріалу полум'ям суміші горючих газів з окислювачем і перенесенні частинок на поверхню деталі, на якій формують шар покриття. Як газоподібне паливо застосовують: ацетилен, пропан, бутан, водень, метан тощо. Окислювачем слугує технічний кисень або повітря.

Температура продуктів згоряння залежить від складу горючої суміші, а найбільшої температури досягають в струменях горючих газів з киснем. Зокрема, для ацетилену вона складає 3100...3200 °С, для пропан-бутанової суміші – 2400...2700 °С, водню – 2100...2500 °С, для метану – 2000...2100 °С [50, 53, 66].

У суміші з повітрям горючі гази дають низькотемпературне полум'я, температура якого становить 500...900 °С. Швидкість розпилюваних частинок коливається в широких межах від 20 до 250 м/с і залежить від їх розмірів, дистанції напилювання, форми вихідного матеріалу (дріт, стрижень, порошок) та інших технологічних факторів [45, 59, 66].

За допомогою газополуменевого напилення отримують покриття товщиною від 0,075 до 2,5 мм і більше. Газополуменеві покриття наносять за допомогою порошкових або дротових апаратів [45, 50, 53, 55].

При напиленні порошковим газополуменевим апаратом напилювальний порошок поступає з живильника в центральне сопло і прискорюється струменем транспортуючого газу. На виході із сопла він попадає в струмінь газового полум'я, де відбувається його нагрівання і перенесення на робочу поверхню деталі.

При «дротовому» напиленні витратний матеріал подають, аксіально або під кутом, до вихідного зрізу сопла газополуменевого апарата, де він розтоплюється в полум'ї газового факела. Також струмінь диспергує

розтоплений матеріал дроту на дрібні частинки та переносить на поверхню деталі, формуючи на ній покриття.

Для подачі дротів використовуються спеціальні подаючі механізми пневматичної або електромеханічної дії. Діаметр дротів знаходиться в межах 3-7 мм і визначається властивостями розпилюваного матеріалу та потужністю апарату. За аналогічною схемою виконується напилення вихідного матеріалу у вигляді стрижня або гнучкого шнура [46, 58, 59].

До переваг газополуменевого напилення можна віднести компактну і просту апаратуру, низький рівень шуму, можливість роботи в польових умовах. Основними недоліками є: вибухонебезпечність горючих сумішей, низький рівень тепломісткості і швидкості витікання струменів, наявність окислювальної атмосфери середовища, необхідність використання додаткового обладнання і матеріалів (ацетиленові генератори, кисневі балони, карбід кальцію), які являють собою небезпеку при проведенні робіт в пожежонебезпечних місцях.

Відомий також метод високошвидкісного газополуменевого напилення покриттів із порошків різноманітних матеріалів: карбідів, оксидів, інтерметалідів, а також металів. Формування покриття відбувається із частинок порошку, які рухаються із надзвуковою швидкістю [35, 59, 66].

Установки для нанесення покриттів можуть бути побудовані на класичній схемі реактивних двигунів, а також із застосуванням в установках сопла Лавалю. Це забезпечує отримання керамічних, металокерамічних, жаростійких, зносостійких покриттів високої щільності та підвищеної міцності зчеплення з основою. Товщина покриття сягає 0,3 мм.

Варто зазначити, що даний метод формування характеризується низьким температурним впливом на матеріал основи (температура поверхні до 150 °С).

Модифікацією методу є використання повітря замість кисню, що здешевлює процес і сприяє подальшому зниженню температури [35, 56].

Спосіб плазмового напилення полягає в утворенні на поверхні деталі покриття, яке формується з частинок матеріалу, який розпилюють, котрим

надають певну теплову та кінетичну енергію. Джерелом енергії виступає струмінь дугової плазми [36, 44, 51, 71], яка є частково або повністю іонізованим газом, сумарний заряд частинок якого (іонів та електронів) дорівнює нулю. Поряд з зарядженими частинками в плазмі можуть бути неіонізовані атоми та молекули. Плазма підкоряється більшості газових законів, однак на відміну від газу вона є електропровідною та взаємодіє з магнітним полем. Температура плазмового струменя коливається в межах від 5000 °С до 55000 °С, а швидкість його витікання з сопла плазмотрона – 1000...2000 м/с. Частинки матеріалу, що розпилюється, прискорюються плазмою до швидкостей 150...200 м/с і вище. Метод універсальний і дозволяє наносити покриття з різних матеріалів: метали, карбіди, оксиди, бориди. Витратні матеріали, з яких формують покриття при плазмовому напиленні, можуть бути у вигляді порошків, дротів, гнучких шнурів.

Напилення покриттів плазмовим струменем здійснюється електродуговими плазмотронами. У плазмотронах плазмоутворюючий газ (азот, аргон, гелій, водень) нагрівається та іонізується внаслідок його взаємодії з електричною дугою, що утворюється між катодом і анодом. До електродів підводять напругу від джерела постійного струму. Катод і анод охолоджують проточною водою. Анодом виступає, як правило, мідне сопло. Існують різні модифікації плазмотронів.

При напиленні покриттів із порошків у однодугових плазмотронах порошок подають із живильника в радіальному напрямку на різних ділянках плазмового розпилювача. Порошок вводять в плазмовий струмінь нижче зрізу сопла, на зріз сопла або безпосередньо в сопло. В двохструминних і трифазних розпилювачах застосовують осьову подачу порошку [57, 59, 67, 71].

Напилення покриттів із дротів виконують двома способами: нейтральним дротом і дротом-електродом. В першому випадку нагрівання, плавлення і розпилення нейтрального дроту здійснюється плазмовим струменем. В другому — на дріт-анод подається позитивний потенціал від джерела струму.

Нагрівання і топлення дроту проходить, в основному, за рахунок виділення тепла на анодній плямі, а плазмовий струмінь виконує функцію розпилувача.

Підвищення якості плазмових покриттів забезпечують захисною атмосферою. Поширеним є також використання захисних соплових насадок для утворення закритого простору для зони напилення і заміни повітря плазмоутворюючим або захисним газом [54, 66]. Застосовують також спеціальні плазмотрони із профільними каналами сопел та напилення в динамічному вакуумі [66].

Детонаційне напилення використовується для отримання захисних покриттів із порошків різних матеріалів (металів та їх сплавів, боридів, оксидів, нітридів тощо) або їх композицій [38, 64, 67, 72].

Нанесення покриттів здійснюється на спеціальних установках. В камеру подається паливно-киснева суміш у певній пропорції. Через спеціальний отвір, в камеру вводять порошкові частинки разом із струменем азоту, в якому вони знаходяться у зваженому стані. Після цього в газовій суміші ініціюють електричну іскру і відбувається вибух, який призводить до виникнення вибухової хвилі з великою кількістю теплової енергії. За таких умов частинки порошку розігріваються до високих температур, що можуть сягати 4000°C і вище та одночасно набувають значних швидкостей (800...1500 м/с), а відповідно – великого запасу кінетичної енергії. Під дією цих факторів на деталі формуються шари покриття, які міцно зчеплені з основою і мають низьку пористість.

Теплофізичні параметри вибухової хвилі та характер протікання вибуху газової суміші регулюють шляхом додавання до її складу газоподібних технологічних додатків, наприклад, аргону або азоту. Ці гази можуть використовуватись також і з метою очищення камери згорання від продуктів вибуху шляхом продування, для закриття каналів робочих газів від дії вибуху.

Процес детонаційного напилення швидкісний – за одну секунду здійснюється 3-4 вибухи. За один цикл напилення забезпечується формування

шару товщиною до 6 мкм, а максимальна товщина покриття може складати 0,2–0,3 мм.

Найбільш істотними недоліками детонаційного напилення є висока вартість обладнання і значний шум під час роботи установки, необхідність великогабаритного обладнання, яке встановлюється стаціонарно.

Серед методів газотермічного напилення вигідно вирізняється електродугове напилення (електродугова металізація – ЕДМ) при якому формування покриттів відбувається в результаті плавлення дротів-електродів в результаті горіння між ними електричної дуги [38, 45, 46, 48, 50, 53, 55, 60, 66], яка виникає при подачі потенціалу на два або три дротових електрода, що рухаються за допомогою спеціальних механізмів подачі електродугового металізатора. Диспергування розтопленого металу виконується потоком стисненого повітря або іншим газом, яке подається із сопла через дугу. Цей же потік виконує транспортування краплин металу до поверхні деталі-цілі.

Відомо, що електрична дуга при ЕДМ якісно мало чим відрізняється від електричної дуги при звичайній зварці електродами, які плавляться, та підкоряється принципу саморегуляції. Для дуг, які виникають при використанні змінного струму, притаманні циклічні етапи горіння, згасання та повторного загартування. Для дуг постійного струму при належному виборі джерела струму та технологічних режимів процесу напилення характерне стійке горіння без будь-яких перерв. За рахунок термічної іонізації температура дуги досягає 6000 °С [45, 53].

Газова система транспортування забезпечує швидкість польоту частинок розтопленого металу до 150 м/с і більше, а їх розміри коливаються в досить широких межах – 10...100 мкм [59].

При використанні в якості електродів дротів з двох різних металів можна отримувати покриття з їх сплавів [50]. Для розширення технологічних можливостей електродугового методу нанесення покриттів застосовують подачу третього, або декількох дротів із різних матеріалів [30, 55], які можуть мати різні швидкості подачі. Композиційні покриття отримують також

застосовуючи полідроти (сформовані із декількох різних електропровідних матеріалів).

Основними напрямками застосування цієї технології є створення антикорозійних покриттів з алюмінію та цинку на сталевих виробках, відновних сталевих покриттів на спрацьованих поверхнях циліндричних або плоских деталей, антикорозійних або жаростійких шарів, а також декоративних мідних, бронзових, латунних покриттів. Головними недоліками даного методу є досить велика дисперсність напилуваних частинок, суттєве вигоряння деяких хімічних елементів, окислювання нанесеного металу, що призводить до неоднорідності покриттів, а головне – обмежена номенклатура матеріалів для розпилення: всі вони повинні бути струмопровідними.

Для подолання останнього, найбільш суттєвого недоліка, було запропоновано використовувати порошкові дроти (трубка із електропровідного матеріалу, заповнена всередині шихтою із різних матеріалів та сполук [35, 53]) для одержання відновних і захисних композиційних покриттів. Зокрема, заслуговують на увагу розробки, виконані у Фізико-механічному інституті імені Г. В. Карпенка НАНУ [53].

Для ефективного використання технології напилення із застосуванням порошкових дротів розробниками було також сконструйовано сучасні розпилюючі системи для електрометалізаційних апаратів, які дозволили збільшити швидкість розпилюючого потоку, зменшити тепловий вплив на компоненти дротів та збільшити міцність зчеплення покритті з основою до 50...60 МПа [53], що наближається до значень характерних для плазмового напилення. Застосування порошкових дротів із спеціальною шихтою на основі карбідів та боридів, феросплавів, порошоків металів та оксидів дозволяє одержувати високолеговані покриття різного призначення. Склад та фізико-механічні властивості покриття визначаються компонентами, використаними при створенні порошкового дроту. Тут також слід відзначити ефективність шихтових матеріалів, які у процесі плавлення викликають протікання екзотермічних реакцій, які забезпечують високу температуру розтоплених

частинок шихти, що сприяє якісному протіканню фізико-хімічних процесів взаємодії частинок в місці контакту з їх основою та забезпечує їх міцне зчеплення.

Виготовлення композитних та порошкових дротів є складним технологічним процесом і тому вони мають високу вартість. До недоліків процесу електродугового напилення покриттів з використанням порошкових дротів слід віднести певні труднощі регулювання необхідного співвідношення компонентів, що входять до їх складу. Крім цього застосування таких дротів не дозволяє отримувати покриття із наперед заданими хімічним складом та фізико-механічними властивостями по товщині напиленого шару, що ускладнює їх подальшу механічну обробку.

Основні характеристики отримуваних різними методами покриттів [53] наведено у табл. 1.1.

Аналіз наведених у табл. 1.1 характеристик металізаційних процесів та властивостей утворених покриттів показує, що серед розглянутих методів напилення електродуговий є самим простим і в той же час найбільш високопродуктивним.

Таблиця 1.1

Порівняльні характеристики металізаційних процесів
та утворених покриттів [53]

| Тип напилення | Швидкість частинок, м/с | Адгезія, МПа | Пористість покриттів, % | Продуктивність, кг/год | Переважна товщина покриття, мм |
|---------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Газополуменеве | 40 | <8 | 10...15 | 1...10 | 0,2...10 |
| Плазмове | 200...300 | 20...70 | 5...10 | 1...5 | 0,2...2 |
| Надзвукове газополуменеве | 600...1000 | >70 | 1...2 | 1...5 | 0,2...2 |
| Електродугове | 100 | 10...30 | 5...10 | 6...60 | 0,2...10 |

Метод електродугової металізації дозволяє наносити на робочі поверхні виробів захисні покриття різного функціонального призначення і вирізняється високою продуктивністю, простотою технологічного обладнання, можливістю широкого застосування засобів автоматизації. Такі особливості роблять електродугову металізацію доступною для ефективного промислового використання, причому практика показує, що сфера застосування її постійно розширюється, як в силу вказаних переваг, так і за рахунок впровадження нових технічних рішень, що розширюють технологічні можливості вказаного способу. До останніх можна віднести використання порошкових дротів [53, 66], формування композиційних покриттів із матеріалу дротів та порошоків, які вводять із живильника в металоповітряний потік [73].

Аналіз патентних джерел та науково-технічної літератури, присвячених дослідженню ЕДМ за вказаними напрямками, показує на необхідність подальших досліджень. Це пов'язано з практично відсутністю у вивчених джерелах інформації про шляхи забезпечення транспортування частинок порошку в центр зони напилення при ЕДМ, що стримує розроблення технології та обладнання для напилення композиційних покриттів електродуговим методом із матеріалу суцільних дротів-електродів та частинок порошку, введених із живильника. Реалізація такого методу формування композиційних покриттів дозволить отримувати покриття з необхідною кількістю шарів. Наприклад, робочий композиційний шар, а верхній – технологічний – формувати з матеріалу сталевих суцільних дротів, що полегшить подальшу механічну обробку деталей з покриттями.

Ряд публікацій [66, 74, 75] присвячено дослідженню руху частинок при плазмовому напиленні та їх нагрівання, але задача вивчення умов введення порошку в металоповітряний потік при електродуговій металізації практично не висвітлена. Тому відсутня інформація щодо технологічних параметрів такого процесу для ефективного формування композиційних покриттів.

Розробка технології формування покриттів електродуговим напиленням проводилась як корпоративними, так і індивідуальними дослідниками.

Вперше газотермічні покриття були отримані швейцарським вченим М. У. Шоопом більше ста років тому (приблизно в 1910 р) [50], який струменем гарячого повітря розпилив розтоплений метал на поверхню зразка, одержавши на його поверхні шар покриття. Розроблений спосіб створення покриттів було запатентовано в ряді країн – Швейцарії, Німеччині, Англії, Франції. Продовжуючи дослідження, Шооп М. У. запропонував в якості джерела електричну дугу і в 1917 р. вперше виготовив електродуговий дрововий апарат.

У промисловості першими з'явилися апарати для газополуменевого напилення в кінці 20-х років минулого століття, а наприкінці 30-х років і для електродугового напилення. Перші плазмотрони для нанесення покриттів з дротів і порошкових матеріалів було впроваджено в кінці 50-х років на початку 60-х років. ВНИИАвтогенмаш, Інститут металургії ім. А. А. Байкова АН СРСР та ін. розробили і виготовили прямі плазмотрони і установки для плазмового напилення. В той же період науковцями під керівництвом Кудінова В.В. виконані роботи [71], які лягли в основу сучасної теорії формування газотермічних покриттів. В фундамент теорії було покладено принципи аналізу просторово-часової структури створення напилених покриттів і розвиток теплових і динамічних процесів, які проходять підчас удару, розтікання та кристалізації напилених частинок. Дана теорія дає певні представлення про утворення покриттів і пояснює їх основні властивості.

В теперішній час роботи із напилення покриттів цими методами проводяться в ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України (м. Львів) під керівництвом Похмурського В. І. Ці роботи спрямовані, зокрема, на покращення технології напилення шляхом використання розроблених ними порошкових дротів, удосконалення конструкції обладнання для напилення та дослідження стійкості цих покриттів до корозії та зносу [53].

Також інтенсивно ведуться роботи у зарубіжних країнах: Німеччина, Швеція, Японія, США, Великобританія.

Відомим розробником обладнання для нанесення покриттів напиленням була Plasma-Technik AG., яка у 1976 р. об'єдналась із швейцарською фірмою

Metco. На даний час фірма Oerlikon Metco Switzerland Oerlikon Surface Solutions Ltd. спеціалізується на виробництві різноманітного обладнання для напилення покриттів, зокрема плазмовим та електродуговим методами у різних модифікаціях [76]. Для напилення покриттів застосовують суцільні дроти, порошкові дроти.

Корпорація Eutectic Castolin що входить до складу німецького MEC Holding GmbH пропонує широкий асортимент обладнання та витратних матеріалів, в т. ч. для напилення, зокрема композиційних покриттів [77].

Корпорація Praxair Surface Technologies, Inc. однією з перших у світовій практиці застосувала метод електродугового напилення для зміни властивостей поверхонь зносу деталей різноманітного обладнання [78]. Співробітниками фірми розроблено ряд технологічних процесів та обладнання для нанесення металізаційних покриттів під загальною торговою маркою TAFA, зокрема електродугового напилення.

Nanosteel, Inc., частина Corporate Headquarters із США спеціалізується на виробництві порошкових електродів та порошоків для нанесення покриттів наплавкою та електродуговим напиленням [79]. Розробка матеріалів пов'язана із дослідженнями властивостей покриття залежно від способу нанесення, зокрема для досягнення високої міцності зчеплення та високої в'язкості покриття для уникання сколювання та відшаровування.

ТЗОВ МНВЦ "Епсілон ЛТД" є офіційним та ексклюзивним представником компанії "Lastek Belgium n.v." (Бельгія) на території України, і займається виробництвом матеріалів для наплавки і напилення.

ВАТ «ВНИИАвтогенмаш» (Росія, Москва) спеціалізується на нанесенні антикорозійних і захисних покриттів методами газополуменевого, електродугового і плазмового напилення [80].

Науково-технічний комплекс "Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона" НАН України пропонує матеріали та обладнання для плазмового нанесення покриттів, а також порошкові дроти для електродугового напилення [81].

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України пропонує комплекс мобільного устаткування для одержання електродугових корозієстійких та зносостійких покриттів, в т. ч. порошкові дроти для електродугового напилення ФМІ-1 [82].

Розробки згаданих фірм [76–82] захищені охоронними документами, а деталі технології у джерелах загального доступу не розкриваються, що робить неможливими подальші дослідження та розвиток обладнання і технологій.

Аналіз цін на електродугові металізатори в Україні показав, що їх вартість коливається в межах 6000 – 20000 грн/шт, залежно від моделі та модифікації. Ціна металізаторів зарубіжного виробництва складає 5000 – 30000 €/шт. Ціна установок для плазмового напилення стартує від 10000 \$ і, залежно від комплектації, сягає 100000 \$.

Вартість розхідних матеріалів для напилення, за даними ТзОВ МНВЦ "Епсілон ЛТД" складає (за 1 кг):

- порошковий дріт з дрібнодисперсним карбідом вольфраму – 173,65 \$;
- карбід вольфраму (порошок) для газотермічного напилення, фракція 40-70 мкм – 149,30 \$;
- карбід титану (порошок) для газотермічного напилення, фракція 80-200 мкм – 112,50 \$;
- дріт сталевий холоднотягнутий, діаметром 2 мм – 8,94 \$.

Очевидно, що вартість обладнання для електродугової металізації значно нижча порівняно з плазмовим, що створює передумови до ширшого її застосування для відновлення деталей бурового і нафтогазового обладнання, вирішуючи при цьому проблему відносно нижчих показників якості покриттів, отриманих електродуговим методом (табл. 1.1).

Існує ряд технологій для покращення якісних показників покриттів, нанесених методами газотермічного напилення [33-35, 46, 83, 99]. Для покращення експлуатаційних властивостей деталей з електродуговими покриттями рекомендують застосовувати комплексні методи, які засновано на поєднанні з різними способами поверхневого зміцнення деталей. Для

покращення властивостей покриттів застосовують низку технологічних методів: термообробку [33], поверхнєве пластичне деформування [83], просочування хімічними розчинами [84], дифузійну металізацію [34], гальванічну обробку напилених покриттів [46], плазмове або лазерне оплавлення покриттів [38, 50, 88–91, 94, 95].

Поряд з вказаними традиційними методами в останній час все більше поширення в даній сфері знаходять електрофізичні методи обробки газотермічних покриттів, такі як лазерна обробка [88, 91], анодно-механічна обробка та електроімпульсне зміцнення [85]. Ці види обробки газотермічних покриттів надають останнім високу твердість, зносостійкість, корозійну та термостійкість, розширюють можливі сфери їх застосування.

Відомо, що для гальванічного хромування або нікелювання поверхню покриття попередньо шліфують і полірують [70]. Основні технологічні параметри процесу: склад електроліту, вид струму, щільність струму, об'єм ванни, товщина покриття. Такі комбіновані покриття мають підвищену зносостійкість та корозійну стійкість при роботі в агресивних середовищах.

Перевагами процесу є відносно дешеве і просте за конструкцією та виготовленням обладнання, відсутність нагрівання деталей, можливість отримувати багат шарові покриття.

До недоліків процесу відносять: наводнення покриттів, що призводить до їх крихкості, зменшення втомної міцності деталей, недостатня міцність зчеплення з основою гальванічних покриттів, а також токсичність хромових електролітів.

Ще одним з розповсюджених методів підвищення ефективності захисту деталей, наприклад, від корозійної дії середовища, в якому вони працюють, а також підвищення їх втомної міцності, є метод, що полягає в суміщенні поверхневого пластичного деформування (ППД) та напилення металевих покриттів цинкового або алюмінієвого. Способи ППД використовують, як фінішну обробку металевих покриттів і, зокрема, напилених [83]. Ця обробка застосовується для зміцнення матеріалу покриття, зменшення його пористості,

а також для формування поверхонь із регульованою шорсткістю. Використовують такі види обробки: алмазне вигладжування, обкочування кульками або роликами. Однак такий процес складно застосовувати до високоміцних покриттів, для яких характерна висока твердість та крихкість. В таких випадках обробка часто призводить до виникнення дефектів у покритті.

Гетерогенність будови напилених композиційних покриттів призводить до неоднорідності властивостей, а, відповідно, і до розкиду експлуатаційних параметрів. Одним із методів покращення однорідності структури покриттів, та забезпечення високих експлуатаційних характеристик є лазерне оплавлення [90]. Регулюючи технологічні параметри лазерної обробки (потужність джерела, часу обробки та ін.) можна керувати термічною дією лазерного променя. Це забезпечує формування поверхні покриття з необхідними фізико-механічними властивостями при мінімальній тепловій дії на основу. Відповідно, не відбуваються зміни структури і геометричних розмірів основи.

В роботах [90, 91] показано, що застосування лазерної обробки поверхні деталей з покриттями покращує їх корозійну стійкість за рахунок зменшення їх пористості та покращення однорідності їх структури. Лазерне оплавлення може застосовуватися також для підвищення міцності зчеплення напилених шарів, проплавляючи їх поверхню на певну глибину. Застосовується така обробка для тонкошарових покриттів [88].

Слід, однак, відзначити, що більшість із вказаних технологій покращують окремі захисні властивості покриттів. Наприклад, пластичним деформуванням поверхні покриття досягають зменшення його пористості; термообробкою досягають структурних змін матеріалу покриття, або підвищують міцність зчеплення його з основою; просоченням хімічним розчином збільшують щільність напилених шарів. В той же час деталі із захисними покриттями працюють, як правило, в середовищах, де крім домінуючого чиннику, для захисту від шкідливої дії якого призначено обробку покриття, існують ще ряд

несприятливих чинників, які, хоча і меншою мірою, все ж негативно впливають на роботоздатність шарів покриття.

Відомі електроіскровий [87, 100–102] та віброелектроіскровий методи [103] поверхневої обробки деталей, які змінюють властивості та, одночасно, дозволяють провести поверхневе легування або нанесення покриття залежно від режимів та програми обробки.

В процесі електроіскрової обробки, крім теплової дії електричних розрядів на поверхню деталі також переноситься матеріал електрода, що здійснює відносно деталі осцилюючий рух. В цьому випадку зона обробки поступово охоплює всю поверхню за рахунок переміщення електрода відносно деталі або навпаки [87, 100–102]. На відміну від електроіскрової при віброелектроіскровій обробці розповсюдження розрядів на поверхні деталі має випадковий (ймовірнісний) характер, враховуючи, що процес обробки виконується в середовищі віброуючих гранул-електродів [103].

Електроіскрова обробка використовується для зміцнення суцільних металів [87, 100–102], а також для підготовки поверхні (формування підшару) для подальшого напилення покриттів [50], однак у літературі практично відсутні дані про електроіскрову обробку напилених покриттів, моделі процесів електроіскрової обробки, що стримує їх більш широке застосування в техніці.

Комбінація електродугового напилення та віброелектроіскрового легування потенційно відкриває великі можливості для забезпечення формування композиційних покриттів з покращеними властивостями. Сполучення в даному комплексному методі механізмів зміцнення різної природи – напилення та поверхневого легування – дасть можливість формувати композиційне покриття з покращеними властивостями. Така гіпотеза дає стимул до розроблення комплексного методу формування композиційних покриттів для підвищення якості поверхонь деталей, що є актуальною задачею, яка має важливе як наукове так і практичне значення.

1.3. Механічна обробка покриттів та визначення припусків на їх обробку

Використання газотермічних покриттів для деталей різного функціонального призначення в багатьох випадках вимагає проведення подальшої механічної обробки їх поверхні. В сфері машинобудування найбільш поширеним видом такої обробки є механічна обробка різанням. Це пов'язано з тим, що поверхні деталей після нанесення покриття часто не відповідають необхідним показникам точності розмірів, форми і взаємного розташування поверхонь, які суттєво впливають на експлуатаційні показники сучасних машин і механізмів. Точність виготовлення окремих деталей, і зокрема, деталей з покриттями, є одним із визначальних критеріїв якості машинобудівних виробів, до складу яких вони належать.

В дослідженнях, присвячених вивченню проблем застосування процесів різання для формоутворення поверхонь деталей з газотермічними покриттями, достатньо уваги приділяється вибору виду обробки [55, 68, 97,104–111] матеріалам різальної частини інструментів, режимам різання, припускам [108, 112–115]. В той же час питання точності виготовлення деталей з покриттями висвітлюються, на нашу думку, в недостатній мірі з точки зору їх комплексності та повноти.

Так, в роботах [105, 111], вивчали застосування мінералокераміки для точіння зносостійких покриттів, зазначеного квалітету точності розмірів обробки, без аналізу факторів її досягнення. В дослідженнях [108,114] розглянуто вплив геометричних похибок заготовки на показники точності напилених зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь деталей типу втулок, включаючи і подальшу механічну обробку напиленого покриття. При цьому в наведеному аналізі похибок враховували тільки просторові відхилення та похибки установки і дали коротку якісну оцінку похибок форми.

Механічній обробці покриттів приділяється значна увага багатьох дослідників [58, 110, 111]. В роботі [48] запропоновано призначати припуск на

механічну обробку деталей з напиленими покриттями в залежності від їх товщини з умов міцності. Такий спосіб призначення припусків призводить до зняття шару покриття значної товщини, що в окремих випадках може досягати до 50 % від загальної товщини покриття.

Автори [112] розробили спосіб визначення припуску на механічну обробку деталей із газотермічними покриттями, який включає обробку зразка з пошаровим видаленням покриття і врахуванням дефектного прошарку, який ґрунтується на визначенні мікротвердості. Спочатку виготовляють поперечний прями́й шліф зразка з покриттям і визначають мікротвердість покриття по глибині з кроком, що відповідає глибині різання при пошаровій механічній обробці. Потім здійснюють з цим же кроком пошарову механічну обробку зразка з покриттям і визначають після кожного проходу мікротвердість оброблених поверхонь. Далі співставляють отримані значення мікротвердості і за критерієм мікротвердості враховують величину прошарку, який піддається наклепу в процесі механічної обробки, та призначають припуск, який дорівнює сумарній величині товщин дефектних прошарків перед початком якісної зони за вирахуванням прошарку, що піддається наклепу.

За результатами досліджень [113], які спрямовані на встановлення закономірностей зміни шорсткості поверхні при пошаровій механічній обробці покриттів, запропоновано визначати припуск за сумарною товщиною знятого шару при якому забезпечується отримання мінімальної шорсткості обробленої поверхні.

Аналіз робіт [104–115] показав, що вони стосуються механічної обробки одношарових зносостійких покриттів, тобто твердий верхній шар покриття знімають різанням і переводять його у стружку, що призводить до значних витрат на зміцнення деталей, однак в літературі практично відсутні відомості про призначення припусків на обробку двошарових покриттів.

1.4. Висновки по розділу

1. На основі проведеного аналізу умов роботи деталей бурового і нафтогазопромислового обладнання виявлено основні причини їх виходу з ладу і обґрунтовано доцільність використання методу електродугового напилення композиційних покриттів завдяки технологічності, універсальності, можливості нанесення покриттів значної товщини як при виготовленні нових, так і відновленні вказаних деталей.

2. Обґрунтовано перспективність створення технології та обладнання для комплексного методу формування композиційних покриттів, який поєднує електродугове напилення з використанням суцільних дротів і введенням частинок порошку із живильника в металоповітряний потік та віброелектроіскрове легування.

3. Недостатньо інформації щодо шляхів вибору технологічних параметрів для забезпечення транспортування частинок порошку в центр зони напилення при електродуговому напиленні композиційних покриттів із суцільних дротів та частинок порошку, введених із живильника в металоповітряний потік, а також впливу площі електроіскрових розрядів на легування поверхні, тому необхідно розробити математичні моделі процесу електродугового напилення та віброелектроіскрового легування.

4. Для раціонального вибору припусків на механічну обробку деталей з покриттями необхідно вивчити вплив товщини зрізаного шару на шорсткість обробленої поверхні. Провести аналіз точності обробки деталей з покриттями.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ КОМПЛЕКСНИМ МЕТОДОМ

2.1. Дослідження руху та нагрівання частинок порошку в процесі напилення композиційних покриттів електродуговим методом

У роботах [2, 3, 6, 10, 17, 20, 23, 26] нами досліджено рух та нагрівання частинок при електродуговому напиленні і на основі цього запропоновано методику оптимального вибору початкових умов руху (початкової швидкості та положення дозуючої трубки), з метою виведення кінцевих точок траєкторій частинок порошку на вісь сопла і тим самим потрапляння їх у центр області напилення без врахування теплообміну із струменем розпилюючого повітря. У роботі [6] ця методика застосована до системи рівнянь, що описують рух та нагрівання частинки у струмені газу, і модифікована на випадок неоднорідних полів його швидкості та температури. Особливістю такого випадку є те, що у неоднорідному полі швидкості вигляд траєкторії залежатиме також і від місця введення частинок у потік повітря. Тому для кожних конкретних вихідних фізичних та геометричних параметрів задачі потрібно узгоджувати початкові умови руху частинок – для заданого початкового положення слід підбирати відповідну початкову швидкість.

У даному параграфі наведено результати математичного моделювання руху та зміни температури частинок порошку за різних початкових умов їх уведення в потік розпилюючого повітря при електродуговому методі напилення для оптимізації технології нанесення композиційних покриттів електродуговим методом.

Тому для розширення технологічних можливостей електродугового методу нанесення покриттів застосовують подачу третього, або декількох

дротів із різних матеріалів [38, 53, 55], або подачу частинок порошку [10, 14, 73] в зону плавлення дротів. Наприклад, за допомогою спеціальних живильників для подачі порошків через дозуючу трубку в потік розпилюючого повітря, що дозволяє отримувати покриття із наперед заданими властивостями по товщині покриття.

Повітряний струмінь, що витікає з сопла електродугового металізаційного апарата у відкритий простір належить до класу струменів, що є затопленими в нерухоме повітряне середовище. Схема затопленого струменя наведена на рис. 2.1. Із зовнішнього боку прикордонний шар струменя взаємодіє із нерухомим повітрям, при цьому під зовнішньою межею розуміють поверхню, у всіх точках якої швидкість повітря дорівнює нулю ($V_g = 0$).

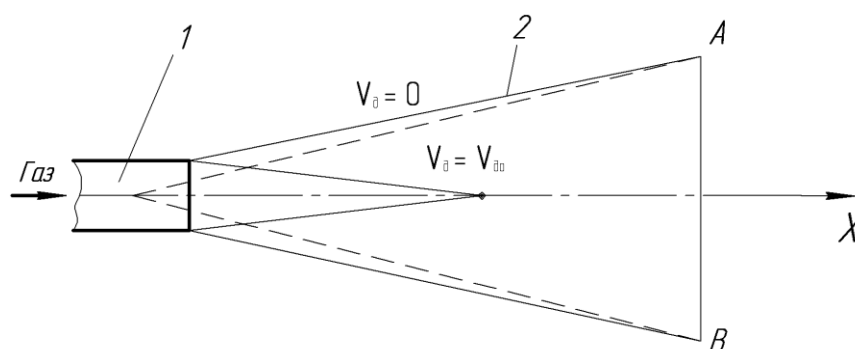


Рис. 2.1. Схема затопленого струменя: 1 – сопло; 2 – повітряний струмінь.

З внутрішнього боку прикордонний шар переходить в ядро струменя, що характеризується постійною швидкістю. Тому на внутрішній межі прикордонного шару розпилюючого повітря швидкість потоку дорівнює швидкості його витоку ($V_g = V_{g0}$) із сопла електродугового металізаційного апарата.

Ділянка струменя від зрізу сопла до січення EF, що проходить через перетин внутрішніх меж називається початковою ділянкою; за січенням EF – головною (основною). Область між внутрішніми межами являє собою ядро струменя, а область між внутрішніми і зовнішніми межами – зону змішування.

Для вирішення задачі про рух частинок порошку при електродуговому напиленні покриття необхідно визначатися з положенням меж розпилюючого струменя газу, що витікає з сопла та із законом зміни швидкості V_g в осьовому і радіальному напрямках.

Закономірності розповсюдження струменя затопленого в середовищі були досліджені в роботі [116]. З огляду на результати таких досліджень здійснимо припущення про зміну параметрів струменя: в ядрі швидкість потоку можна рахувати постійною, і рівною її середньому значенню в початковому сеченні – на зрізі сопла; в поперечному сеченні зони змішування початкової ділянки параметри струменя змінюються від їх значень в ядрі до значень в оточуючому середовищі; швидкість по осі основної ділянки постійно зменшується, в поперечному сеченні ділянки швидкість змінюється від їх осьових значень до значень в оточуючому середовищі на зовнішній границі струменя; внутрішня і зовнішня межа струменя є кінчними поверхнями.

Положення меж струменя визначається половиною кута його розкриття

$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = 3,4 \cdot a,$$

Тут a – коефіцієнт турбулентності для даного сопла з врахуванням діаметра дротів. Коефіцієнт a визначається за емпіричним виразом

$$a = \left(0,4 \frac{d_{dp}}{D_0} \right)^{2,56} + a_1,$$

де d_{dp} - діаметр дротів, мм;

D_0 - діаметр повітряного сопла, мм;

a_1 - коефіцієнт турбулентності для даного сопла за відсутності дротів.

При значеннях $d_{dp} = 2$ мм, $D_0 = 4$ мм, $a_1 = 0,055$ маємо

$$a = \left(0,4 \cdot \frac{0,002}{0,004} \right)^{2,56} + 0,055 \approx 0,07 \text{ і значення кута } \frac{\theta}{2} \text{ буде таким}$$

$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = 3,4 \cdot a = 3,4 \cdot 0,007 = 0,238 \Rightarrow \frac{\theta}{2} \approx 13,5^\circ.$$

Визначимо довжину початкової ділянки за наведеними вище параметрами згідно емпіричного виразу [55]

$$\frac{\ell_0}{D_0/2} = \frac{0,67}{a};$$

звідки

$$\ell_0 = \frac{0,67D_0}{2a} = \frac{0,67 \cdot 4}{2 \cdot 0,07} \approx 19 \text{ мм.}$$

Таким чином, отримали положення зрізу дозуючої трубки живильника з порошком при умовах, що він буде знаходитися в конусі повітряного струменя і в межах початкової ділянки із урахуванням діаметра дозуючої трубки $d_T = 2$ мм.

За таких умов, відстань від зрізу сопла до кінця дозуючої трубки встановимо рівною $\ell_T = 10$ мм. Тоді радіус струменя r_c в даному січені визначимо з співвідношення [55]

$$\frac{r_c}{D_0/2} = 3,4 \frac{D_0}{2} \left(0,29 + \frac{a\ell_T}{D_0/2} \right),$$

звідки

$$r_c = 3,4 \frac{D_0}{2} \left(0,29 + \frac{a \cdot \ell_T}{D_0/2} \right) = 3,4 \cdot 2 \left(0,29 + \frac{0,07 \cdot 10}{2} \right) = 4,5 \text{ мм.}$$

Одержані значення r_c , ℓ_T дають наближену початкову інформацію про можливе розташування кінця дозуючої трубки порошкового живильника відносно зрізу та осі сопла металізаційного апарату, а також про умови введення частинок порошку в струмінь розпилюючого повітря при електродуговому напиленні.

Для оптимального розташування кінця дозуючої трубки живильника необхідно виконати розрахунок траєкторії руху частинок порошку у вертикальній площині. Залежно від розташування кінця дозуючої трубки будемо підбирати початкову швидкість руху з умови попадання частинок порошку у центр області напилення.

Дослідження руху та зміни температури частинок порошку, введених у струміль газу здійснюємо за таких модельних припущень: 1) радіальна швидкість поширення газового струменя є значно менша від його осьової швидкості, тому її значенням нехтуємо (приймаємо рівною нулю); 2) поля температури та швидкостей газового струменя вважатимемо стаціонарними, тобто незмінними в часі; 3) унаслідок малих розмірів частинок порошку та швидкий перебіг процесу поширення тепла у металах, фактичний розподіл температури у об'ємі частинки не враховуємо і вважаємо, що температура змінюється одночасно для всієї частинки; 4) під час руху частинки порошку не змінюють форму та розміри; 5) концентрація частинок порошку в струмені повітря незначна та їх присутність не впливає на параметри металогазового потоку.

При електродуговій металізації для формування композиційних покриттів введення частинок порошку у конус повітряного струменя здійснюється у радіальному напрямку. За таких умов вважаємо, що задача володіє осьовою симетрією, тобто рух частинки характеризується двома координатами і відбувається у вертикальній площині, яка проходить через вісь сопла електродугового металізатора та дозуючої трубки порошкового живильника. Дослідження проводимо в системі координат Oxy з початком в полюсі газового струменя, спрямувавши вісь Ox вздовж осі сопла в напрямку поверхні на яку напілюють покриття, а вісь Oy – вертикально вгору (рис. 2.2). При цьому вважатимемо, що частинки порошку рухаються під дією власної ваги G і сили аеродинамічного опору $F_{оп}$. Всі інші сили, що можуть виникати у процесі руху частинки порошку, наприклад за рахунок нерівномірного розподілу градієнтів тиску та швидкості струменя повітря, та запізнення відклику середовища на зміну її швидкості, вважаються такими, що мають незначний вплив унаслідок малості часу руху та розмірів цієї частинки.

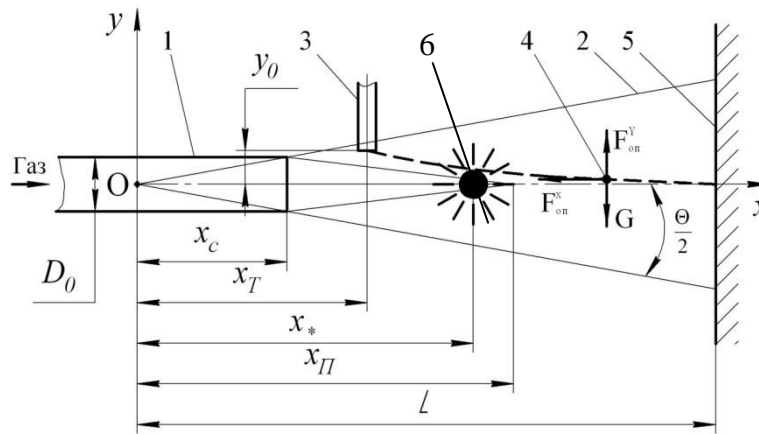


Рис. 2.2. Розрахункова схема введення частинок порошку в металоповітряний потік при електродуговому напиленні композиційних покриттів:

1 – сопло; 2 – повітряний струмінь; 3 – дозуюча трубка живильника; 4 – частинка порошку; 5 – поверхня на яку напилюється покриття; 6 – електрична дуга (точкове джерело тепла).

З метою визначення кінематичних та теплових характеристик процесу електродугового напилення композиційних покриттів запишемо диференціальні рівняння руху та нагріву твердої частинки введеної у повітряний струмінь і дослідимо залежність їх розв'язків від вихідних технологічних параметрів процесу та початкових умов.

Диференціальні рівняння руху. Рух та нагрівання частинок порошку в струмені газу в рамках прийнятих припущень описується системою диференціальних рівнянь

$$m_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} = \frac{1}{2} C_d S_{mid} \rho_g |\vec{V}_g - \vec{V}_p| (\vec{V}_g - \vec{V}_p) + m_p \vec{g}, \quad (2.1)$$

$$c_p m_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha_p S_{surf} (T_g - T_p), \quad (2.2)$$

де m_p – маса частинки порошку, кг.

V_p – швидкість частинки порошку, м/с;

V_g – швидкість розпилюючого газу, м/с;

T_p – температура частинки порошку, °С;

T_g – температура струменя газу, °С;

ρ_g – густина газу, кг/м³.

c_p – питома теплоємність частинки порошку, Дж/(кг·°С).

d_p, r_p – діаметр та радіус сферичної частинки порошку відповідно, м;

S_{mid} – площа міделевого січення частинки порошку, м²;

Коефіцієнт лобового опору C_d та коефіцієнт тепловіддачі α_p визначаються із критеріальних співвідношень згідно відомих емпіричних залежностей

$$C_d = \frac{24}{Re} \left(1 + 0,15 Re^{0,687} \right), \quad \alpha_p = Nu \frac{\lambda_g}{d_p}; \quad (2.3)$$

$$Re = \frac{\rho_g d_p |\vec{V}_g - \vec{V}_p|}{\mu_g}, \quad Nu = 2 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad Pr = \frac{\mu_g c_g}{\lambda_g}. \quad (2.4)$$

Тут Re , Nu , Pr – числа Рейнольдса, Нуссельта та Прандтля відповідно;

μ_g – коефіцієнт динамічної в'язкості газу, Н·с/м²;

λ_g – коефіцієнт теплопровідності газу, Вт/(м·°С);

c_g – питома теплоємність газу, Дж/(кг·°С);

Площа поверхні, площа міделевого січення та маса частинки порошку сферичної форми визначаються відповідно за формулами

$$S_{surf} = \pi d_p^2, \quad S_{mid} = \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad m_p = \frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6}.$$

Для обчислення значень горизонтальної складової швидкості $V_{g,x}(x, y)$ (за припущенням $V_{g,y}(x, y) \equiv 0$), а також температури $T_g(x, y)$ струменя повітря, розглянемо його спрощену схему, що складається з початкової ділянки з сталою осью швидкістю та основної частини, де осьова швидкість є змінною. Встановлено, що для турбулентних газових струменів поперечні

профілі обезрозмірених величин горизонтальної швидкості та температури у межах основної ділянки ($x > x_{\Pi}$) мають універсальний вигляд [116]

$$\frac{V_{g,x}(x,y)}{V_{g,x}(x,0)} = \left(1 - \left(\frac{y}{b(x)} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}, \quad \frac{T_g(x,y) - T_H}{T_g(x,0) - T_H} = 1 - \left(\frac{y}{b(x)} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

Спадання швидкості та температури газу вздовж осі струменя ($y=0$) на основній ділянці ($x > x_{\Pi}$) здійснюється за гіперболічним законом

$$\frac{V_{g,x}(x,0)}{V_{g,x}^0} = \frac{x_{\Pi}}{x} = \frac{\frac{a}{R_0} x_{\Pi}}{\frac{a}{R_0} (s_0 + s)} = \frac{0,96}{0,29 + \frac{as}{R_0}}, \quad (2.5)$$

$$\frac{T_g(x,0) - T_H}{T_{g\Pi} - T_H} = \frac{x_{\Pi t}}{x} = \frac{\frac{a}{R_0} x_{\Pi t}}{\frac{a}{R_0} (x_c + s)} = \frac{0,7}{0,29 + \frac{as}{R_0}}. \quad (2.6)$$

Тут $b(x) = tg \frac{\theta}{2} \cdot x$ – змінний радіус струменя повітря; $R_0 = D_0 / 2$ – радіус сопла; $a \approx 0,07$ – коефіцієнт турбулентності сопла; s – координата із початком відліку на зрізі сопла; $x_c = 0,008$ м – глибина полюса струменя ($x_c = x - s$); x_{Π} , $x_{\Pi t}$ – координати перехідних перерізів профілів швидкості та температури; $T_{g\Pi}$, T_H – значення температури повітря у перехідному перерізі струменя та у навколишньому середовищі; $V_{g,x}^0$ – швидкість повітря у початковому перерізі струменя (на зрізі сопла).

Із виразів (2.2.5), (2.2.6) видно, що перехідний переріз профілю температури знаходиться дещо ближче до початку струменя ніж перехідний переріз профілю швидкості ($x_{\Pi t} = 0,02$ м, $x_{\Pi} = 0,027$ м). На початковій ділянці струменя ($x_c \leq x \leq x_{\Pi}$) швидкість струменя вздовж осі не міняється і дорівнює початковому значенню на зрізі сопла $V_{g,x}(x,0) = V_{g,x}^0 = \text{const}$.

Щодо визначення поля температури на початковій ділянці і врахування високих температурних градієнтів у безпосередній близькості до електричної дуги, використаємо модель точкового джерела тепла, сталої потужності q (Вт) у рухомому середовищі. Вважатимемо, що джерело тепла розміщене в точці $(x_*, 0)$, а середовище рухається з постійною швидкістю $V_{g,x}^0$ у додатному напрямку осі Ox . Таким чином, у рамках припущень про усталені режими струменя повітря та поширення тепла, стаціонарне поле температури у межах початкової ділянки ($x_c < x < x_{пт}$) у площині Oxy опишемо формулою [117]

$$T_g(x, y) = \frac{q}{4\pi\lambda_g R_*} \exp\left[-\frac{V_{g,x}^0}{2k^2}(R_* - (x - x_*))\right].$$

Тут $R_* = \sqrt{(x - x_*)^2 + y^2}$ – відстань до джерела тепла, $k^2 = \frac{\lambda_g}{\rho_g c_g}$ – коефіцієнт температуропровідності повітря, m^2/s .

Унаслідок ідеалізації моделі, пов'язаною із заміною електричної дуги певних розмірів, точковим джерелом тепла, у місці його розташування $(x_*, 0)$ виникає сингулярність поля температури. З метою усунення фізичного протиріччя на значення поля температури накладемо обмеження $T_g(x, y) < T_{\max}$, де T_{\max} – максимально допустима температура електричної дуги. Згідно даних [45, 118, 119] температура дуги міняється в межах $T_{\max} = 5800 \dots 6200$ °С.

Потужність електричної дуги, що впливає на градієнт температури середовища поблизу дуги визначимо за формулою

$$q = IU,$$

де I – сила струму, А; U – напруга, В. Для електродугового наплення залежно від матеріалу та діаметрів дротів-електродів $D = 0,0015 \dots 0,002$ м ці параметри знаходяться в межах: $I = 70 \dots 150$ А; $U = 25 \dots 35$ В [55].

Остаточні формули для інженерного розрахунку поля температури від точкового джерела тепла та горизонтальної складової швидкості у довільній точці газового струменя представимо у вигляді:

$$T_g(x, y) = \begin{cases} \frac{q}{4\pi\lambda_g R_*} \exp\left[-\frac{V_{g,x}^0}{2k^2}(R_* - (x - x_*))\right], & x_c \leq x < x_{\text{пт}}; \\ T_H + (T_{g\text{пт}} - T_H) \left(1 - \left(\frac{y}{b(x)}\right)^{3/2}\right) \frac{x_{\text{пт}}}{x}, & x_{\text{пт}} \leq x < x_{\text{max}}. \end{cases} \quad (2.7)$$

$$V_{g,x}(x, y) = \begin{cases} V_{g,x}^0 \left(1 - \left(\frac{y}{b(x)}\right)^{3/2}\right)^2, & x_c \leq x < x_{\text{пт}}; \\ V_{g,x}^0 \left(1 - \left(\frac{y}{b(x)}\right)^{3/2}\right)^2 \frac{x_{\text{пт}}}{x}, & x_{\text{пт}} \leq x < x_{\text{max}}. \end{cases} \quad (2.8)$$

Результати, обчислення температури та швидкості за формулами (2.7), (2.8), показані на рис. 2.3.

Спроектувавши векторне рівняння руху (2.1) на осі координат та враховуючи вирази (2.3), (2.4), отримаємо систему взаємопов'язаних рівнянь, що описують рух та нагрівання частинки порошку у струмені розпилюючого газу

$$\begin{aligned} \frac{dV_{p,x}}{dt} &= \frac{18\mu_g}{d_p^2\rho_p} \left(1 + 0,15 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V\right)^{0,687}\right) (V_{g,x} - V_{p,x}), \\ \frac{dV_{p,y}}{dt} &= \frac{18\mu_g}{d_p^2\rho_p} \left(1 + 0,15 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V\right)^{0,687}\right) (V_{g,y} - V_{p,y}) - g, \\ \frac{dT_p}{dt} &= \frac{6\lambda_g}{d_p^2\rho_p c_p} \left(2 + 0,6 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V\right)^{1/2} \left(\frac{\mu_g c_g}{\lambda_g}\right)^{1/3}\right) (T_g - T_p). \end{aligned} \quad (2.9)$$

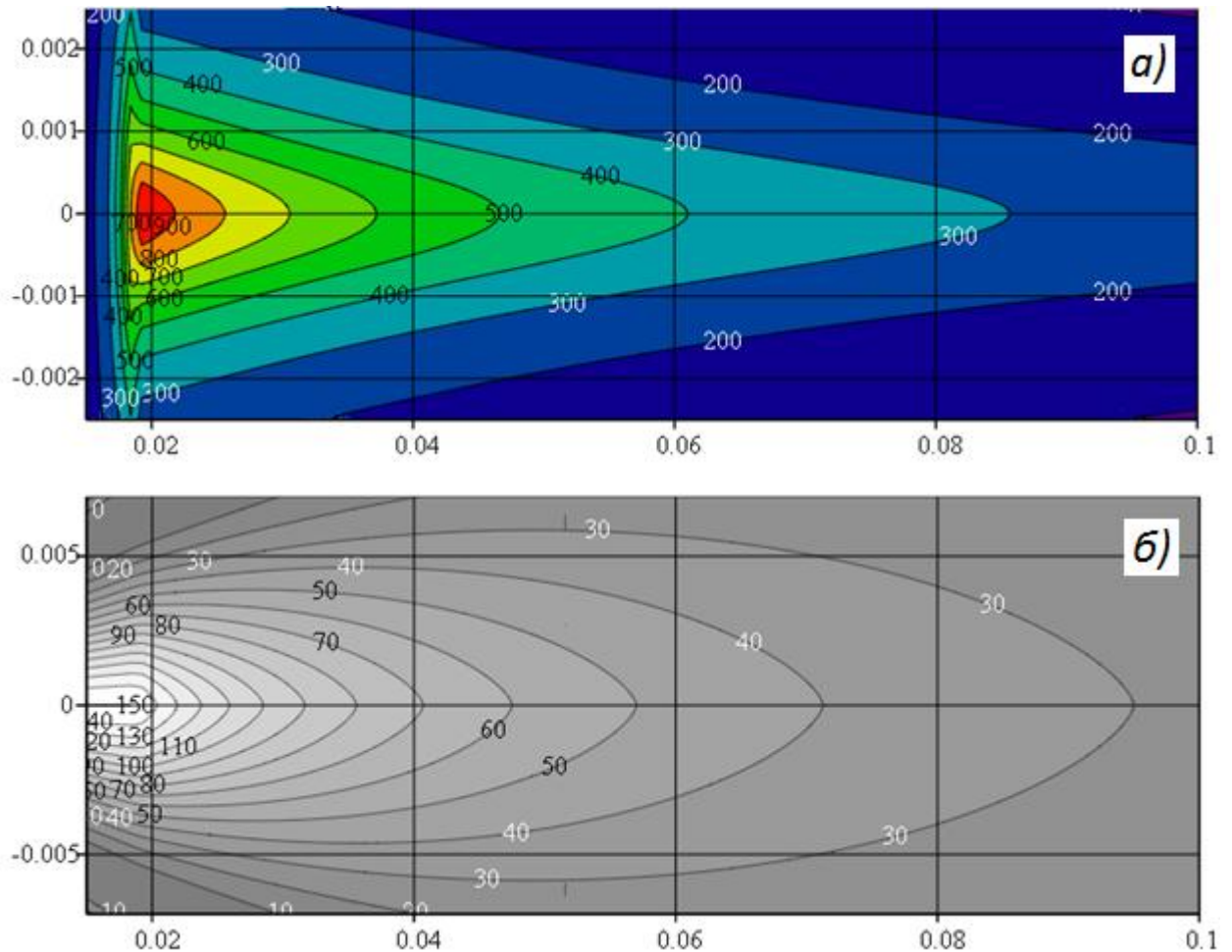


Рис. 2.3. Поле температури $T_g(x, y)$ (а) та поле горизонтальної складової швидкості $V_{g,x}(x, y)$ (б) в осьовому перерізі струменя розпилюючого повітря.

Тут $V = \sqrt{(V_{g,x} - V_{p,x})^2 + (V_{g,y} - V_{p,y})^2}$ – модуль відносної швидкості частинки порошку у струмені розпилюючого повітря.

Розв'язок системи рівнянь (2.9) визначатиме зміну швидкості та температури частинки у часі. Наявність у останньому рівнянні величини V відображає очевидний факт, що температура частинки залежатиме від її відносної швидкості, а тим самим і від часу перебування у потоці повітря.

Для визначення закону руху частинки $x_p = x_p(t)$, $y_p = y_p(t)$ та побудови її траєкторії систему (2.9) потрібно доповнити залежностями

$$\frac{dx_p}{dt} = V_{p,x}(t), \quad \frac{dy_p}{dt} = V_{p,y}(t). \quad (2.10)$$

Варто зазначити, що у випадку стаціонарного розподілу полів швидкостей \vec{V}_g та температури T_g розпилюючого газу система рівнянь (2.9) явно не міститиме часову змінну t . У такому разі можна отримати незмінні у часі, координатні залежності швидкості та температури частинки безпосередньо вздовж траєкторії, що мають більшу наочність та є зручними для аналізу і практичного використання. Для цього у похідних від швидкостей перейдемо до диференціювання за координатами

$$\frac{dV_{p,x}}{dt} = \frac{dx_p}{dt} \frac{dV_{p,x}}{dx_p} = V_{p,x} \frac{dV_{p,x}}{dx_p}, \quad \frac{dV_{p,y}}{dt} = \frac{dy_p}{dt} \frac{dV_{p,y}}{dy_p} = V_{p,y} \frac{dV_{p,y}}{dy_p},$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{dx_p}{dt} \frac{dT_p}{dx_p} = V_{p,x} \frac{dT_p}{dx_p}.$$

Після підстановки вищенаведених виразів систему рівнянь (2.9) запишемо у вигляді

$$V_{p,x} \frac{dV_{p,x}}{dx_p} = \frac{18\mu_g}{d_p^2 \rho_p} \left(1 + 0,15 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V \right)^{0,687} \right) (V_{g,x} - V_{p,x}),$$

$$V_{p,y} \frac{dV_{p,y}}{dy_p} = \frac{18\mu_g}{d_p^2 \rho_p} \left(1 + 0,15 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V \right)^{0,687} \right) (V_{g,y} - V_{p,y}) + g,$$

$$V_{p,x} \frac{dT_p}{dx_p} = \frac{6\lambda_g}{d_p^2 \rho_p c_p} \left(2 + 0,6 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_g c_g}{\lambda_g} \right)^{1/3} \right) (T_g - T_p). \quad (2.11)$$

Для визначення складових параметрів руху частинок порошку у потоці розпилюючого повітря отримані рівняння слід розв'язувати задавши для системи (2.9), (2.10) умови у початковий момент часу:

$$V_{p,x}|_{t=0} = V_{p,x}^0, \quad V_{p,y}|_{t=0} = V_{p,y}^0, \quad x_p|_{t=0} = x_p^0, \quad y_p|_{t=0} = y_p^0, \quad T_p|_{t=0} = T_p^0, \quad (2.12)$$

а для системи (2.11) умови у початковій точці руху:

$$V_{p,x} \Big|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} = V_{p,x}^0, \quad V_{p,y} \Big|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} = V_{p,y}^0, \quad T_p \Big|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} = T_p^0. \quad (2.13)$$

Числовий розв'язок систем нелінійних диференціальних рівнянь (2.9) та (2.11) з відповідними початковими умовами (2.12), (2.13) отримали за допомогою алгоритму Рунге-Кутта 4-го порядку.

Обчислення проводили для частинок порошку з таких матеріалів: алюміній, титан, карбід титану, молібден, карбід вольфраму середньої грануляції ($d_p = 50 \cdot 10^{-6}$ м), за початкових умов введення: $x_0 = 0,01$ м, $y_0 = 0,002$ м, $V_{px}^0 = 0$ м/с, $V_{py}^0 = 0,5$ м/с і значень фізичних параметрів повітряного струменя: $V_{gx}^0 = 150$ м/с, $T_p^0 = T_H = 20$ °С, $\rho_g = 0,277$ кг/м³, $\mu_g = 49 \cdot 10^{-6}$ Н·с/м², $\lambda_g = 8,07 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·°С), $c_g = 1,185 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°С).

Зміну температури частинки порошку різних матеріалів вздовж горизонтального переміщення ілюструє рис. 2.3. Для порівняння також наведено температуру повітряного потоку вздовж кожної з траєкторій. Розрахунок температури частинок порошку здійснювали виходячи з умови, щоб максимальна температура нагріву не перевищувала температуру плавлення. Дана умова забезпечується вибором місця введення частинок у потік повітря відносно точкового джерела тепла, а також початковою швидкістю їх руху.

Як видно з графіків, наведених на рис. 2.4, температура частинок порошку різко зростає практично до температури плавлення в момент введення у зоні дії точкового джерела тепла (електричної дуги). Далі відбувається поступове зниження температури у потоці повітря, залишаючись при цьому досить високою на момент досягнення поверхні напилення. Слід відзначити, що спадання температури частинок порошку відбувається швидше для матеріалів із більшою температурою плавлення. Порівняно із температурою частинок, утворених розпиленням із суцільних дротів-електродів, в кінці дистанції напилення [50, 53], температура частинок порошку введених у струмінь розпилюючого повітря згідно із запропонованим способом [10, 14] є

дещо менша але цілком достатня для формування якісних композиційних покриттів.

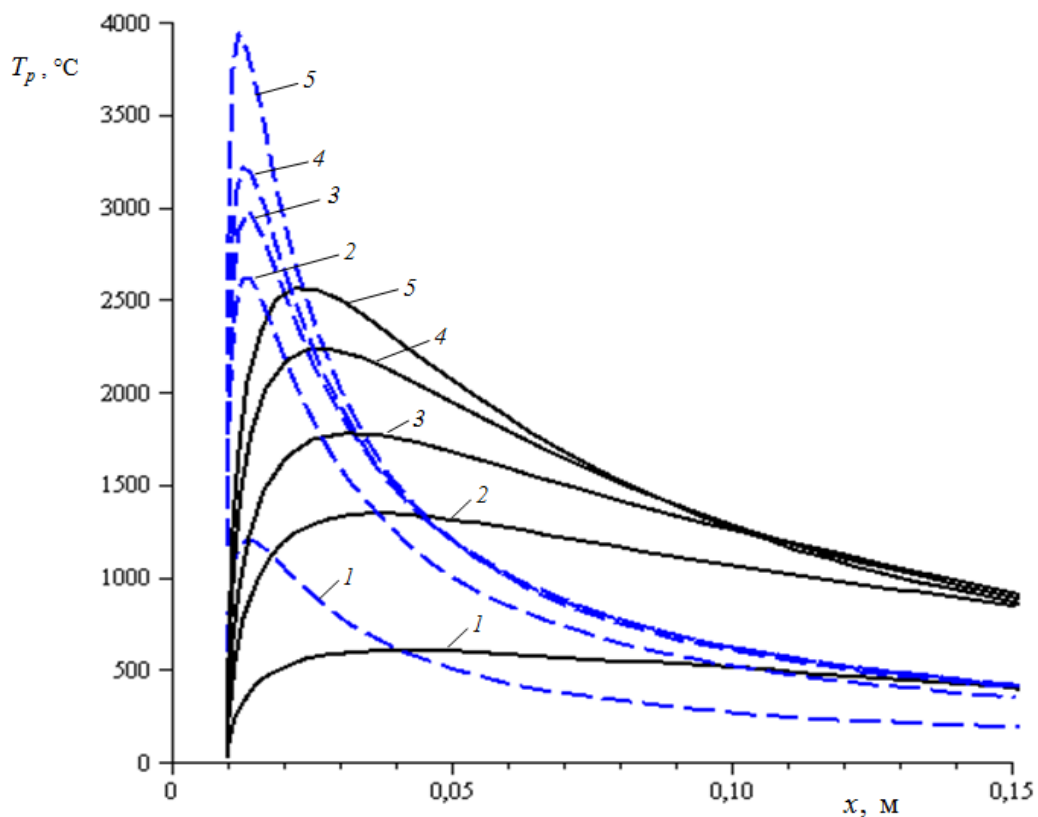


Рис. 2.4. Залежність температури частинок порошку від переміщення (суцільні лінії) та температура розпилюючого повітря вздовж відповідних траєкторій частинок (штрихові лінії):

1 – алюміній; 2 – титан; 3 – залізо; 4 – молібден; 5 – карбід вольфраму.

Залежність горизонтальної складової швидкості частинок порошку з різних матеріалів від переміщення подано на рис. 2.5. З рисунка видно, що фактично відразу ж після моменту введення у потік повітря швидкість частинок зростає до певної величини і далі в процесі руху практично не міняється. Також є очевидним факт, що частинки порошку матеріалів меншої питомої густини досягають більших швидкостей.

Траєкторії руху частинок порошку різних матеріалів, які розраховані за однакових початкових умов введення, зображено на рис. 2.6.

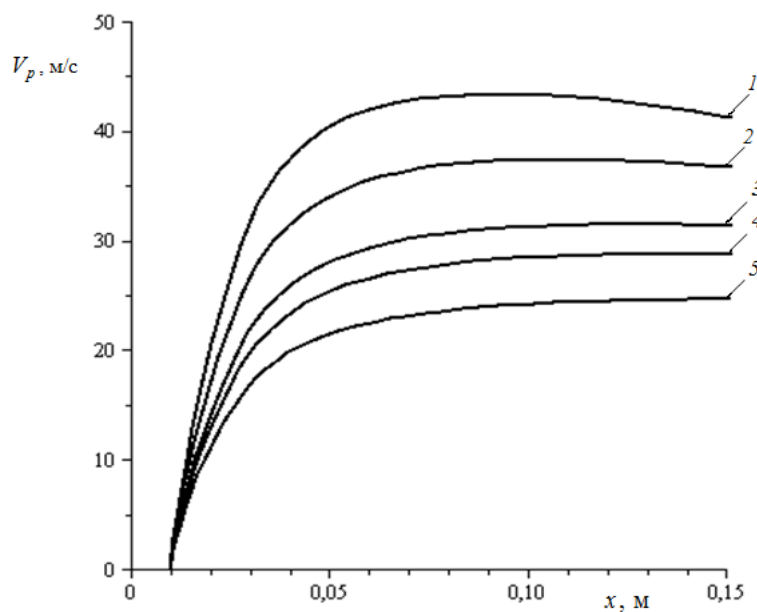


Рис. 2.5. Залежність горизонтальної швидкості частинок порошку від переміщення:

1 – алюміній; 2 – титан; 3 – залізо; 4 – молібден; 5 – карбід вольфраму.

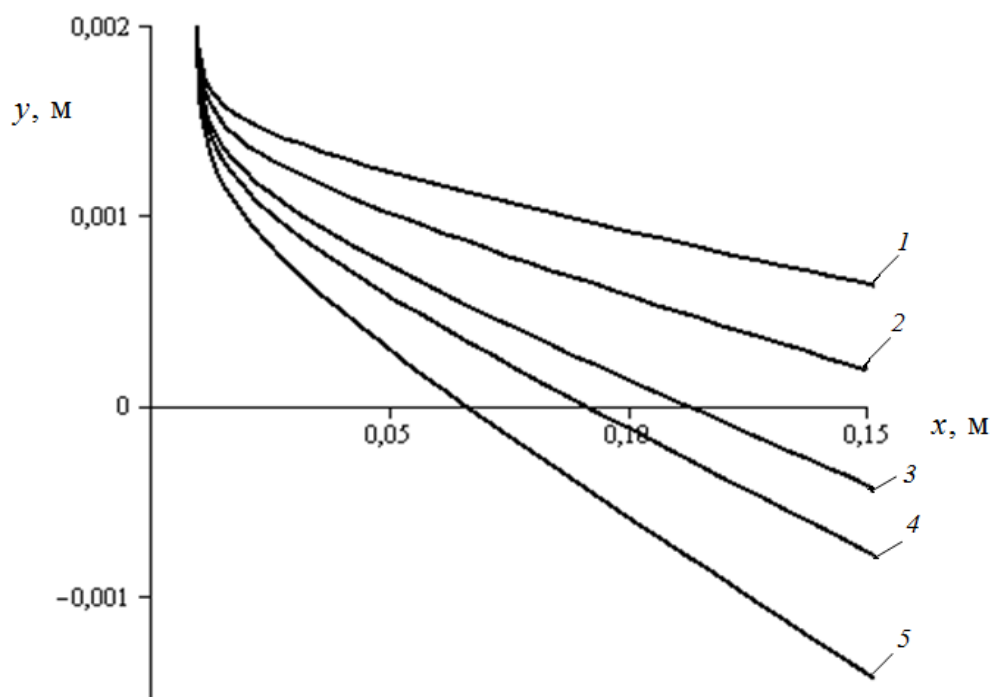


Рис. 2.6. Траєкторії руху частинок порошку для значень $x_p^0 = 0,01$ м, $y_p^0 = 0,002$ м, $V_{px}^0 = 0$ м/с, $V_{py}^0 = -0,5$ м/с:

1 – алюміній; 2 – титан; 3 – залізо; 4 – молібден; 5 – карбід вольфраму.

За однакових початкових умов руху траєкторії частинок важчих матеріалів значно відхилятимуться від частинок аналогічних розмірів меншої питомої густини. З метою, забезпечення попадання основної маси частинок порошку у центр області напилення, згідно запропонованого способу нанесення композиційних покриттів [10, 14], для кожного матеріалу необхідно підібрати початкові умови введення його частинок у повітряний струмінь, так, щоб у кінці дистанції напилення, траєкторії вийшли на вісь симетрії повітряного потоку. Особливістю такого підбору є те, що у неоднорідному полі швидкостей вигляд траєкторій руху залежатиме також і від місця введення частинок порошку у потік повітря. Таким чином для кожних конкретних вихідних фізичних та геометричних параметрів задачі потрібно узгоджувати початкові умови руху – для заданого початкового положення кінця дозуючої трубки слід підбирати відповідну початкову швидкість введення частинок порошку в потік. Оптимальні початкові умови за дистанції напилення $L = 0,15$, м для забезпечення потрапляння частинок порошку вибраних матеріалів в центр зони напилення та прийнятих фізичних параметрів задачі наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Режими введення частинок порошку в металоповітряний потік для забезпечення потрапляння їх в центр зони, при напиленні композиційних покриттів електродуговим методом

| Умови введення | Матеріал порошку | Алюміній | Титан | Залізо | Молібден | Карбід вольфраму |
|--|---|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| | Координати введення $(x_p^0; y_p^0)$, м | 0,01; 0,002 | 0,01; 0,002 | 0,01; 0,015 | 0,01; 0,015 | 0,01; 0,001 |
| Швидкість введення V_{py}^0 , м/с | 0,8 | 0,6 | 0,40 | 0,25 | 0,15 | |

Згідно з умовами запропонованого способу напилення температура частинки порошку в кінці дистанції є дещо менша від температури частинок утворених розпиленням із суцільних дротів-електродів, але цілком достатня для забезпечення формування якісних композиційних покриттів.

2.2. Ймовірно-математичне дослідження процесу формування покриття при віброелектроіскровому легуванні

Для підвищення якості поверхневих шарів деталей машин застосовують імпульсні технології зміцнення. Найбільше поширення серед них в машинобудуванні отримали лазерна, електроіскрова та віброелектроіскрова обробка, а також електроімпульсні нанотехнології.

В процесі електроіскрової обробки, крім теплової дії електричних розрядів на поверхню деталі також переноситься матеріал електрода, що здійснює відносно деталі осцилюючий рух. В цьому випадку зона обробки поступово охоплює всю поверхню за рахунок переміщення електрода відносно деталі або навпаки [38, 100, 101]. На відміну від електроіскрової при віброелектроіскровій обробці розповсюдження розрядів на поверхні деталі має випадковий (ймовірнісний) характер, враховуючи, що процес обробки виконується в середовищі віброуючих гранул-електродів [103].

При розробленні технологічних процесів зміцнення поверхні деталей машин обробкою іскровими розрядами та оптимізації технологічних параметрів необхідно мати ймовірнісні характеристики цих процесів.

Особливо важливим є знання законів розподілу іскрових розрядів, які виникають на необробленій поверхні та часу, необхідного для покриття розрядами всієї поверхні деталі, що підлягає легуванню, одним шаром розрядів, тому, що від них залежать технологічні параметри процесу зміцнення.

Для обґрунтування технологічних параметрів віброелектроіскрового легування досліджували процес зміцнення поверхні деталі при дії іскрових

розрядів у залежності від площі обробки одним імпульсом розряду та від їх кількості. При проведенні теоретичних досліджень використано елементи теорії ймовірності для знаходження математичного сподівання, щоб встановити залежність між площею поверхні деталі, що зміцнюється, площею одиничного іскрового розряду та кількості цих одиничних імпульсів розряду, що діють на поверхню.

Нехай площа поверхні деталі, яка зміцнюється, дорівнює F , а площа поверхні, яка обробляється одним імпульсом іскрового розряду – f . Вважаємо, що кожний наступний імпульс розряду обробляє або повністю необроблену поверхню, або повністю оброблену. Таким чином, після дії n -го імпульсу розряду виявиться обробленою поверхня площею $F_o = j \cdot f$ для деякої кількості іскрових розрядів $j=1, 2, \dots, n$.

Нехай F_n – площа частки обробленої поверхні деталі після дії n -ої кількості імпульсів іскрового розряду. Позначимо ймовірність обробки частки поверхні деталі: $P_{nj} = P(F_n = j \cdot f)$.

Тоді за формулою повної ймовірності (при $n \geq 2$) [120] маємо

$$P_{nj} = P_{(n-1)j} \cdot \frac{j \cdot f}{F} + P_{(n-1)(j-1)} \frac{F - (j-1)f}{F}, \quad (2.14)$$

так як

$$P\left(\frac{F_n = j \cdot f}{F_{n-1} = j \cdot f}\right) = \frac{j \cdot f}{F},$$

і:

$$P\left(\frac{F_n = j \cdot f}{F_{n-1} = (j-1) \cdot f}\right) = \frac{F - (j-1)f}{F}.$$

Згідно геометричного визначення ймовірності, враховуючи, що ймовірність обробки поверхні деталі іскровим розрядом поза її межами неможлива, можемо записати:

$$P\left(\frac{F_n = j \cdot f}{F_{n-1} = (j-k) \cdot f}\right) = 0, \quad k = 2, 3, \dots, j-1.$$

Врахувавши, що система подій $\{F_{n-1} = l \cdot t\}$, ($l = 1, 2, \dots, j$) утворює повну групу подій, а також те, що ймовірність обробки поверхні першим розрядом $P_{11} = 1$, одержимо (ввівши позначення $x = \frac{f}{F}$)

$$P_{nj} = a_{nj} x^{n-j} (1-x) \cdot \dots \cdot (1-(j-1)x), \quad (2.15)$$

де a_{nj} – коефіцієнти многочлена. Їх величини визначаються із рекурентного співвідношення

$$a_{nj} = j \cdot a_{(n-1)j} + a_{(n-1)(j-1)}, \quad a_{11} = 1. \quad (2.16)$$

Звідси знаходимо математичне сподівання (середнє значення) площі, обробленої поверхні деталі після дії n-го імпульсу іскрового розряду

$$MF_n = Fx \sum_{j=1}^n j \cdot a_{nj} x^{n-j} (1-x) \cdot \dots \cdot (1-(j-1)x) = F(1 - (1-x)^n). \quad (2.17)$$

Для знаходження середньої кількості імпульсів іскрового розряду \bar{n} , необхідних для обробки s-тої частки поверхні деталі F, приймемо, що площа $F \equiv 1$. Тоді, із (2.17) знаходимо:

$$s = 1 - (1-x)^n \quad (2.18)$$

Звідси отримуємо $(1-x)^n = 1-s$. Прологарифмувавши обидві частини вказаного рівняння знайдемо середню кількість імпульсів іскрового розряду \bar{n} :

$$\bar{n} \approx \frac{\ln(1-s)}{\ln(1-x)}. \quad (2.19)$$

У розрахунках приймаємо ціле число n, отримане заокругленням його дробової частини у більшу сторону.

Наприклад, для співвідношення площі одиничного імпульсу іскрового розряду $x = \frac{f}{F} = 0,001$, і площі деталі, яка зміцнюється $s = 0,99$, згідно формули (2.19) розрахована кількість імпульсів іскрового розряду становить $\bar{n} = 4603$.

У загальному випадку, для визначення кількості імпульсів розряду згідно формули (2.19), розглянемо функцію

$$h(x, s) = \frac{\ln(1-s)}{\ln(1-x)}, \quad (2.20)$$

що визначає необхідну кількість імпульсів іскрового розряду в залежності від площі одного імпульсу розряду x і частки поверхні s , яку потрібно обробити. Результати ймовірно-математичного моделювання процесу вібро-електроіскрового легування представлені на рис. 2.7.

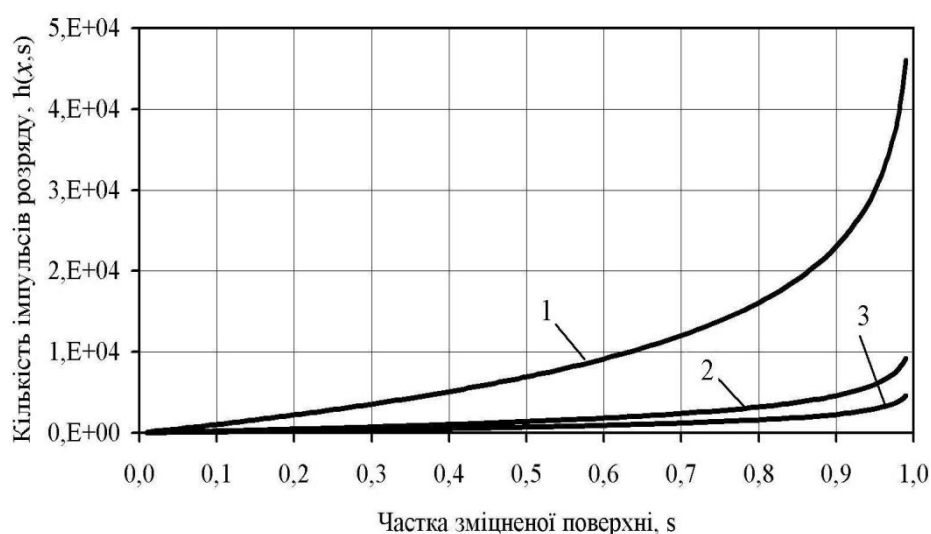


Рис. 2.7. Графік визначення кількості імпульсів іскрового розряду, які забезпечують зміцнення відповідної частки поверхні при заданій площі імпульсу розряду, кв. од.: 1 – $x_1 = 0,0001$; 2 – $x_2 = 0,0005$; 3 – $x_3 = 0,001$.

Встановлено, що із збільшенням площі одиночного іскрового розряду відбувається легування поверхні деталі при меншій кількості імпульсів розрядів.

Аналізуючи представлені на рис. 2.7 графічні залежності відзначимо загальну для них тенденцію, а саме – для збільшення частки обробленої поверхні s необхідна більша кількість імпульсів іскрових розрядів. При цьому із збільшенням площі одиночного іскрового розряду x , для обробки заданої

частки площі поверхні s кількість імпульсів розряду значно зменшується. Наприклад, якщо площа одного імпульса збільшується в 10 разів відповідно з $x_1 = 0,0001$ кв.од. до $x_2 = 0,001$ кв.од. то для обробки частки поверхні $s = 0,99$ кількість імпульсів зменшується приблизно в 9 разів.

2.3. Висновки до розділу

1. Визначено залежності параметрів руху та температури частинок порошку, введених із живильника у потік розпилюючого повітря від технологічних параметрів при напиленні композиційних покриттів електродуговим методом. Для досліджуваних матеріалів частинок порошку (алюміній, титан, залізо, молібден, карбід вольфраму) визначено оптимальні початкові умови введення їх у неоднорідний потік розпилюючого повітря для забезпечення потрапляння цих частинок у центр області напилення покриття.

2. Встановлено, що температура нагрівання, введених із живильника частинок порошку, в кінці дистанції є дещо менша від температури частинок, утворених розпиленням металу суцільних дротів-електродів, але цілком достатня для забезпечення умов формування якісних композиційних покриттів.

3. Аналіз отриманих результатів досліджень свідчить, що частка поверхні обробленої деталі залежить від кількості імпульсів іскрових розрядів та величини їх площі.

4. Результати теоретичних досліджень слугують основою для розроблення технології формування композиційних покриттів комплексним методом.

РОЗДІЛ 3

ВИБІР МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕНЬ, РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ КОМПЛЕКСНИМ МЕТОДОМ

3.1. Вибір матеріалів, металорізального обладнання, різальних інструментів і вимірювальних приладів

3.1.1 Досліджувані матеріали. У роботі досліджували формування покриттів на зразках із сталей, які широко використовують у нафтогазовому машинобудуванні: сталь 45 ГОСТ 1050-88, сталь 40Х, сталь 40ХН ГОСТ 4543-71. Хімічний склад та механічні властивості сталей наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Хімічний склад та властивості сталей

| Марка сталі | Вміст елементів, % (вагові) | | | | | | Механічні властивості | | | |
|----------------|-----------------------------|------|------|------|------|-------------|-----------------------|------------------|--------------|------------|
| | С | Si | Mn | Cr | Ni | інші | σ_T , МПа | σ_B , МПа | δ , % | ψ , % |
| Сталь 45 | 0,46 | 0,30 | 0,66 | 0,16 | 0,17 | Cu– 0,05 | 410 | 680 | 19 | 61 |
| Сталь 40Х | 0,42 | 0,18 | 0,67 | 0,98 | 0,27 | Cu– 0,10 | 720 | 840 | 14 | 60 |
| Сталь 40ХН | 0,41 | 0,29 | 0,72 | 0,75 | 1,27 | Cu– 0,28 | 760 | 900 | 20 | 39 |
| Сталь 18ХН2МФЛ | 0,19 | 0,22 | 0,55 | 0,50 | 2,10 | Mo– 0,25 | 310 | 520 | 21 | 59 |

В якості матеріалу суцільних дротів діаметром 2 мм застосовували: сталь Св08, сталь 45, сталь 40Х ($\rho_c = 7,87 \text{ г/см}^3$), а також алюміній А1 ($\rho_{Al} = 2,7 \text{ г/см}^3$). Для отримання композиційних покриттів їх матрицю формували із матеріалу

дротів, а як наповнювач використовували порошки: титану, молібдену, карбїду титану і карбїду вольфраму. Розмір частинок порошку, який вводили із живильника у металоповітряний потік, становив 40...100 мкм. Як гранули для віброелектроіскрового легування застосовували тверді сплави ВК8, ТК15, а також нікель та молібден. Крім того, застосовували нікелеві пластини для футерування електродів. Для об'ємного та поверхневого армування породоруйнівних елементів застосовували твердий сплав релїт з таким хїмічним складом, % (вагові): вольфрам – (95,7 – 96,3); вуглець зв'язаний – (3,6 – 4,1); вуглець вільний – менше 0,14. Питома густина: релїту $\rho_{wc} = 15,7 \text{ г/см}^3$ [121, 122].

Методи підготовки поверхні зразків. Зразки перед нанесенням покриття обезжирювали в 3-5% розчині кальцинованої соди, підігрітому до температури 60 – 80 °С, промивали в проточній воді та висушували при температурі 100 – 110 °С.

Підготовку поверхні перед напиленням покриттів здійснювали такими методами:

– дробоструменева обробка (виконували на дробоструменей установці інжекційного типу. Матеріал – сталевий шрот з розміром частинок 0,8 – 1,2 мм. Тиск повітря – 0,6 МПа. Дистанція обробки становила 150 – 200 мм, при куті нахилу сопла 90°. Час обробки від 3 до 5 хв. Висота мікронерівностей R_z – 60 – 120 мкм. Аналогічні параметри рельєфу отримували й іншими методами підготовки поверхні [55, 123];

– нарізування «рваної» різьби з висотою профілю 0,15 мм (проводили на токарно-гвинторізному верстаті різьбовим різцем, встановленим нижче рівня центрів. Відстань від торця різцетримача до вершини різця 100 мм) [55, 66];

– віброелектроіскрове легування проводили на модернізованій нами установці в середовищі гранул електропровідного матеріалу при густині струму – 10 А/см² і напрузі – 10...20 В [4, 15, 25].

3.1.2 Металорізальне обладнання, різальний інструмент і вимірювальні прилади.

Металорізальне обладнання та різальний інструмент. Досліди з обробки різанням напилених покриттів виконували на металообробних верстатах: токарної групи – 1А616, 16К20, 16К20Ф3; шліфувальної групи – круглошліфувальному 3М151 і плоскошліфувальному 3Г71.

Як різальний інструмент для токарної обробки, враховуючи особливості гетерогенної будови напилених покриттів, використовували різці, які оснащені тврдосплавною різальною частиною: різець прохідний з пластиною з твердого сплаву Т15К6 з параметрами різальної частини: головний кут в плані $\varphi = 45^\circ$; головний задній кут $\alpha = 8^\circ$; передній кут $\gamma = 10^\circ$; допоміжний кут в плані $\varphi_1 = 10^\circ$; кут нахилу різальної кромки $\lambda = 0^\circ$.

Шліфування поверхонь деталей з покриттями виконували на круглошліфувальному 3М151 і плоскошліфувальному 3Г71 верстатах кругами з монокорунду. Режими обробки такі: колова швидкість круга $V_k = 25 - 30$ м/с, повздожня подача – 0,2 – 0,4, ширина круга на оберт деталі, поперечна подача круга (глибина різання) – 0,015 – 0,025 мм.

Для визначення сил різання при оброблянні напилених покриттів використовували динамометричний пристрій, який встановлювали на супорті в різцетримачі токарного верстата (рис. 3.1). Перед початком досліджень пристрій тарували з використанням взірцевого динамометра (0...10 кН).

Вимірювальні прилади та інструменти. Вимірювання основних характеристик зразків із композиційними покриттями виконувалися за допомогою таких вимірювальних засобів:

– зміну маси зразків після випробовувань визначали на аналітичних вагах ВЛР-200г 2 класу ГОСТ 19491-74, точність зважування $\pm 0,05$ мг;

– лінійні розміри зразків вимірювали мікрометром МК 25 ГОСТ 6507-90 з ціною поділки 0,01 мм, а також для цих цілей в окремих випадках

використовувався малий інструментальний мікроскоп МИМ-1 з точністю $\pm 0,01$ мм;

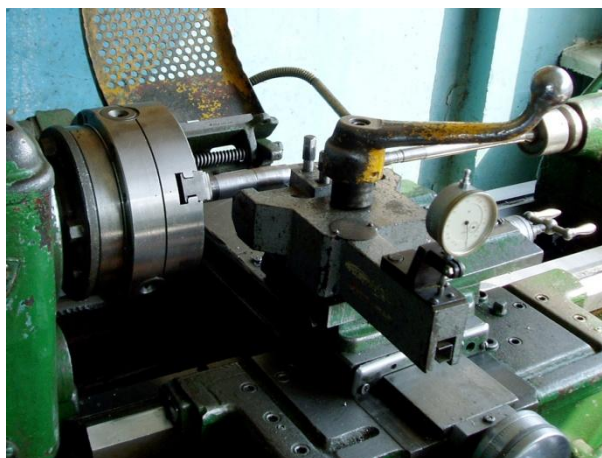


Рис. 3.1. Загальний вигляд пристрою для вимірювання сил різання при точінні покриттів на токарно-гвинторізному верстаті 1А616.

Для вимірювання зносу різців після точіння деталей з покриттями використовували спеціальний пристрій (рис. 3.2). Контроль лінійного зношування різця визначали на основі результатів двох вимірів (після проведення токарної обробки різець охолоджували до кімнатної температури) за допомогою індикаторів годинникового типу з точністю 0,001 мм.

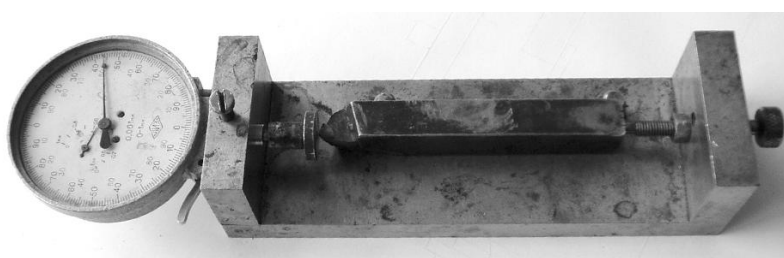


Рис. 3.2. Загальний вигляд пристрою для вимірювання ступеня зношення різця при точінні покриттів.

Методика визначення шорсткості. Шорсткість зразків після нанесення покриттів, а також після проведення їх механічної обробки визначали за допомогою модернізованого приладу профілографа-профілометра моделі

P-201 виробництва заводу «Калибр». На цьому приладі мікронерівності поверхні вивчали шляхом запису нерівності поверхні в збільшеному масштабі електрометричним способом. Запис профілограми здійснювали на електротермічному папері при швидкості давача 1 мм/хв і швидкості паперу 200 мм/хв. Висоту нерівностей R_z (ГОСТ 2789-73) профілю за десятьма точками визначали сумою середніх арифметичних абсолютних відхилень точок п'яти найбільших мінімумів $H_{i \min}$ і п'яти найбільших максимумів $H_{i \max}$ профілю в межах базової довжини

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i \min}| \right). \quad (3.1)$$

Середнє арифметичне відхилення R_a профілю наближено можна знайти як середнє арифметичне абсолютних значень відхилення профілю в межах базової довжини

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (3.2)$$

де y – відхилення профілю, яке визначається відстанню між будь-якою точкою профілю і середньою лінією і виміряне по нормалі, що проведена до середньої лінії через цю точку.

3.2. Методики дослідження властивостей та будови композиційних покриттів

3.2.1 Методи випробовування на зношування покриттів.

Дослідження трибологічних властивостей покриттів проводили у відповідності з умовами роботи захисних втулок валів відцентрових насосів та бурильних замків колони труб на стандартній машині тертя СМЦ-2 за схемою диск – колодка. Випробовувані зразки для такої схеми тертя показано на рис. 3.3. Покриття наносили на зовнішню циліндричну поверхню диска (діаметр – 50 h8; висота – 10 мм).

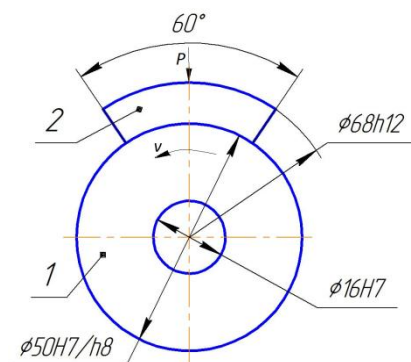


Рис. 3.3. Схема випробовування зразків на машині тертя СМЦ-2:

1 – диск; 2 – колодка.

Випробовування проводилися за різних лінійних швидкостей $v = 0,7\text{--}7,9$ м/с з питомим тиском на ролик $p = 1$ МПа, причому ролик на $1/3$ діаметра занурювали в ємність з глинистим розчином з масовою часткою кварцевого піску розміром частинок $0,1$ мм – 10% . Температура розчину – 20 °С. Для забезпечення однорідності абразивного середовища розчин перемішували. Тривалість випробувань складала 24 години. Ступінь зношування зразків визначали через кожні чотири години випробовування шляхом зважування на лабораторних аналітичних вагах моделі ВЛА-200-М, а потім розраховували їх об'ємне зношування.

Випробовування на зношування захисних втулок валів відцентрових насосів (додаток Г) проводили на стенді ІФНТУНГ (рис. 3.4), спроектованому і виготовленому згідно рекомендацій [124].

Стенд містить відцентровий насос (напір – 32 м), електродвигун (число обертів – 2850 хв⁻¹), бак для бурового розчину, манометри, витратомір і засувки. Буровий розчин з абразивними частинками всмоктується у відцентровий насос і під тиском подається у бак. Величину напору регулюють за допомогою засувок і контролюють манометром. Ресурс роботи захисних втулок визначали в годинах (при критичній величині витікання бурового розчину через сальникове ущільнення).



Рис. 3.4. Загальний вигляд стану для випробовування захисних втулок вала відцентрового насоса.

3.2.2 Методика електрохімічних досліджень і визначення рівня допустимих напружень у зразках з покриттями. Мікроелектрохімічні вимірювання проводили із використанням розробленого нами мікроелектрода [13] з діаметром робочої частини мікрокапіляра 5 мкм на спеціальній установці [125] на мікрошліфах зразків з покриттями, які закріплювали у захоплювачах установки. На двохкоординатному столі установки змонтовано оптичний мікроскоп з великою фокусною відстанню і трикоординатний мікроманіпулятор для підведення мікроелектрода до поверхні мікрошліфа, яка досліджується. Цей стіл забезпечує переміщення мікроскопа з маніпулятором (точність переміщення стола – 5 мкм). Електрохімічні вимірювання проводили у водяному електроліті з низькою електропровідністю ($0,009 \text{ н } \text{H}_2\text{SO}_4 + 0,14 \% \text{ H}_2\text{O} + 0,00005 \% \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) [125]. Сканування мікроелектродом здійснювали вздовж і впоперек мікрошліфа покриття (рис. 3.5).

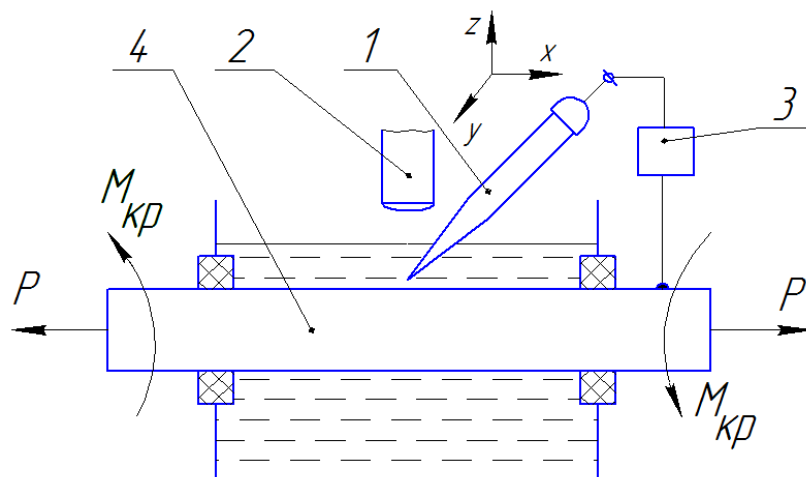


Рис. 3.5 Схема електрохімічних вимірювань на зразках з покриттями:

1 – електрод (мікроелектрод) порівняння, встановлений на трикоординатному маніпуляторі; 2 – оптичний мікроскоп; 3 – вольтметр; 4 – зразок з покриттям.

Для визначення рівня допустимих напружень у зразках з покриттями при розтягу силою P , а також при крученні з моментом $M_{кр}$ використовували стандартні зразки для випробовування матеріалів. Навантаження зразків у електроліті здійснювали на установці та реєстрували величину навантаження і значення електродного потенціалу. В момент утворення в покритті тріщини виникає стрибок електродного потенціалу. За рівень допустимих напружень у зразках з покриттями приймали напруження, при якому ще не утворюються тріщини у покритті.

3.2.3 Методика визначення мікротвердості. Мікротвердість зразків з покриттями визначали на приладі ПМТ-3 на поперечних мікрошліфах від поверхні зразка в глибину, а також на поверхні шліфа вздовж його осі. При вимірюванні мікротвердості звертали особливу увагу на час опускання індентора і витримку під навантаженням для всіх випадків вимірювання (15 с). Визначення мікротвердості проводили при навантаженні на піраміду 0,5 Н, а в окремих випадках 1 Н. Відстань між відбитками алмазної піраміди по довжині мікрошліфа складала 40–50 мкм, а по глибині 20–40 мкм.

3.2.4 Методика визначення міцності зчеплення покриття з основою.

Міцність зчеплення покриття з основою є однією з важливих властивостей, що визначає його роботоздатність. Величину міцності зчеплення визначали: на зріз та штифтовим методом при нормальному відриві [50]. Схеми випробовувань зображені на рис. 3.6. Циліндричний зразок 1 (рис. 3.6, а) та циліндричну оправку (зразок) 1 і конічний штифт 3 (рис. 3.6, б) виготовляли із того ж матеріалу, що і деталь, на яку наносять покриття.

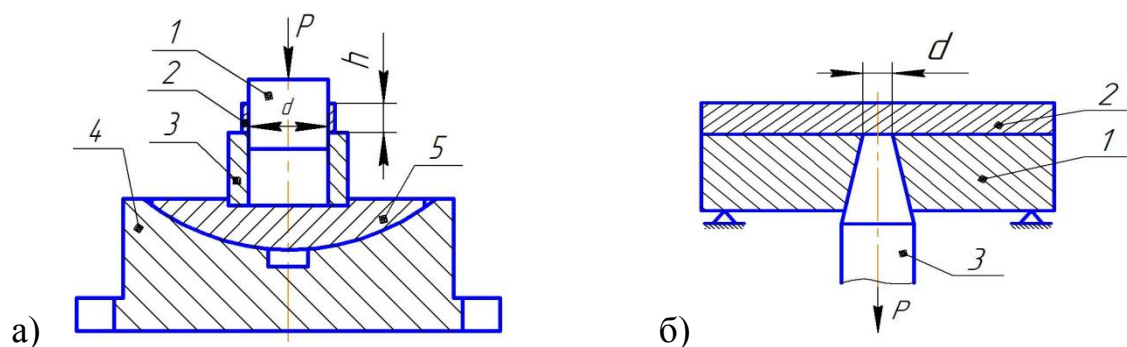


Рис. 3.6. Схеми випробовування покриттів на зріз (а):

1 – циліндричний зразок; 2 – покриття; 3 – матриця; 4 – основа; 5 – сферична опора, та на нормальний відрив (б): 1 – циліндричний зразок (оправка); 2 – покриття; 3 – конічний штифт.

Величину міцності зчеплення покриття з основою на зріз визначали за формулою

$$\tau = \frac{P}{S}, \quad (3.3)$$

де P – величина сили зрізу, Н; d – діаметр основи покриття, м; h – висота зони напиленого покриття, м;

S – площа зрізу покриття, ($S = \pi dh$), м².

Величину міцності зчеплення покриття з основою при нормальному відриві визначали методом штифта за формулою

$$\sigma_{зч} = \frac{4P}{\pi d^2}, \quad (3.4)$$

де P – величина сили відриву, Н; d – діаметр меншої основи конуса, м.

3.2.5 Методика визначення залишкових напружень в покриттях. При формуванні покриттів відбуваються незворотні об'ємні зміни які спричиняють утворення залишкових напружень (макронапруження). Відомо, що залишкові напруження I-го роду в покриттях значною мірою впливають на експлуатаційні характеристики деталей. В нашій роботі залишкові осьові напруження I-го роду визначають за методикою [126], розробленою в Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України на циліндричних зразках довжиною 150 мм і діаметром 20 мм. В основу цієї методики покладено принцип вимірювання деформації, яка виникає внаслідок порушення рівноважного стану зразка при пошаровому розчиненні шарів металу покриття з його нижньої половини циліндричної поверхні (рис 3.7).

Формула для визначення залишкових напружень

$$\sigma_{ост} = -B \frac{d\varepsilon}{d\delta_i} + E \int_0^{\delta_i} A_{\delta_{i-1}} d\delta_{i-1}, \quad (3.5)$$

де B і A – коефіцієнти;

E – модуль Юнга другого роду.

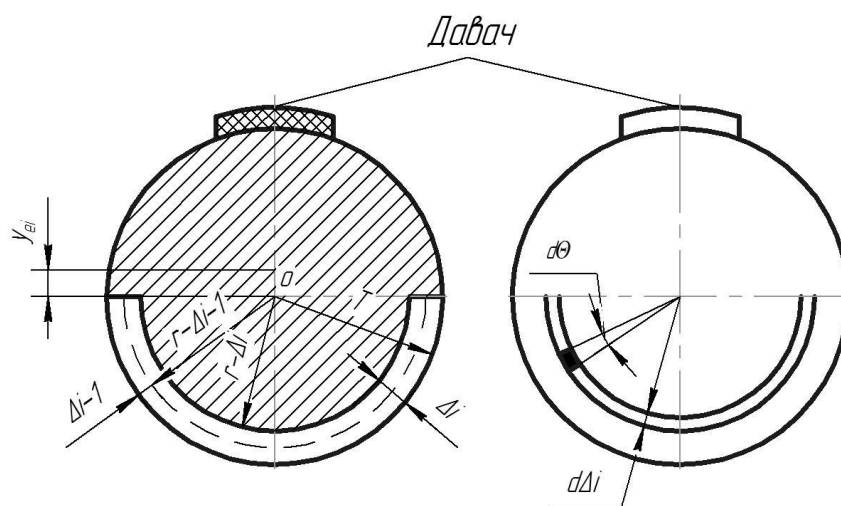


Рис. 3.7. Розрахункова схема для визначення залишкових напружень в зразку круглого перерізу.

Коефіцієнт B розраховують за формулою

$$B = \frac{E}{\left\{ \frac{[2(r - \delta_i) + \pi y_{ei}] J_{\delta_i}}{J_{\delta_i}} - \frac{\pi}{F_{\delta_i}} \right\} (r - \delta_i)}, \quad (3.6)$$

де r – радіус зразка; δ_i – сумарна товщина знятого шару; δ_{i-1} – товщина знятого попереднього шару; y_{ei} – центр маси перерізу зразка після зняття шару,

$$y_{ei} = \frac{4[(r - \delta_i)^3 - r^3]}{3\pi[(r - \delta_i)^2 - r^2]}; \quad l_{\delta_i} - \text{відстань від центра мас до нижнього волокна};$$

$$J_{\delta_i} - \text{момент інерції зразка після розчинення шару, } J_{\delta_i} = \frac{\pi}{8} [(r - \delta_i)^4 - r^4];$$

$$F_{\delta_i} - \text{площа перерізу зразка, } F_{\delta_i} = \frac{\pi}{2} [(r - \delta_i)^2 - r^2]$$

Похідні $\frac{d\varepsilon}{d\delta_i}$ обчислюють за допомогою параболічної апроксимації після

експериментального визначення деформації, яка спричинена видаленням з покриття певної товщини шару матеріалу.

Коефіцієнт $A_{\delta_{i-1}}$ розраховують за формулою

$$A_{\delta_{i-1}} = \frac{\frac{[2(r - \delta_{i-1}) - \pi y_{ei-1}](r - \delta_i + y_{ei-1})}{J_{\delta_{i-1}}} + \frac{\pi}{F_{\delta_{i-1}}}}{\frac{[2(r - \delta_{i-1}) + \pi y_{ei-1}] J_{\delta_i}}{J_{\delta_{i-1}}} - \frac{\pi}{F_{\delta_{i-1}}}}. \quad (3.7)$$

Для спрощення обчислення залишкових напружень з достатньою для практики точністю величини коефіцієнтів B і A можна також визначити графоаналітичним методом.

Вимірювання деформації зразків проводили з використанням тензOMETричних давачів опору ФК-П-20-200. Як електроліт для електрохімічного розчинення тонких шарів покриття використовували розчин такого складу: 100 г сірчанокислового цинку і 50 г хлористого натрію на 1 літр дистильованої води. Густина струму 5 А/дм². Залежності зміни залишкових напружень за товщиною покриття будували як середні від випробовування трьох зразків [126].

3.2.6 Дослідження мікроструктури покриттів. Дослідження структури зразків з покриттями проводили на металографічному мікроскопі МИМ-8 на поперечних мікрошліфах. Для травлення шліфів застосовували спиртовий розчин азотної кислоти. Концентрацію включень у композиційних покриттях та пористість визначали планіметричним методом на мікрошліфах. Використовували також сканівний електронний мікроскоп EVO-40XVP (виробництва фірми Zeiss) для оцінки тонкої структури композиційних покриттів.

3.3. Розробка та модернізація обладнання для формування композиційних покриттів

3.3.1. Розробка установки для наплення композиційних покриттів електродуговим методом із матеріалу суцільних дротів та порошків. З метою виконання завдань роботи нами на основі теоретичних досліджень (розділ 2), а також винаходів та патентів (рис. 3.8) розроблено конструкцію і виготовлено експериментальну установку для електродугового наплення композиційних покриттів з матеріалу дротів і порошків, які вводять у металоповітряний потік із живильника [2, 3, 6, 10, 14, 17, 20, 23, 24, 26, 27].

Загальний вигляд та схему установки наведено на рис. 3.9. Вона включає такі основні вузли і системи: металізаційний апарат з порошковим живильником, токарний верстат, систему електроживлення, пневматичну та вентиляційну системи. Головним робочим елементом установки є модернізований електрометалізатор ЕМ-6, який відрізняється від серійно виготовленого апарату тим, що його оснащено порошковим живильником, з якого порошок поступає через дозуючу трубку з косим зрізом кінця у зону дугового розряду. В зоні дуги він змішується з краплями розтопленого матеріалу дротів-електродів, відтак утворена метало-порошкова суміш транспортується стисненим повітрям, що витікає з сопла металізаційного

апарату, на поверхню циліндричного зразка, формуючи на ній шар захисного композиційного покриття.

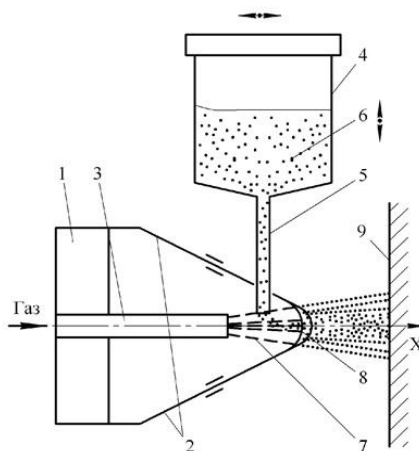
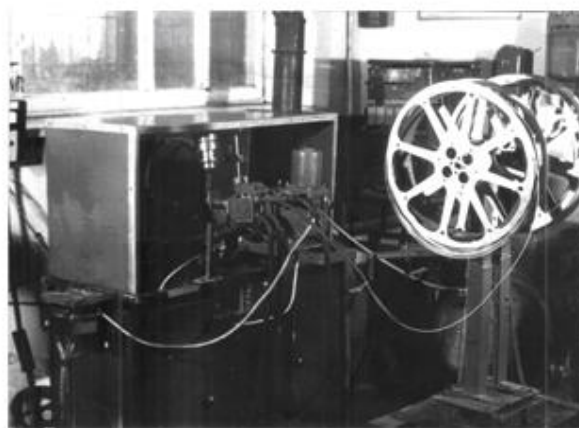


Рис. 3.8. Схема введення порошків із живильника при електродуговому напиленні композиційних покриттів (А. с. № 788503; Патент № 40784):

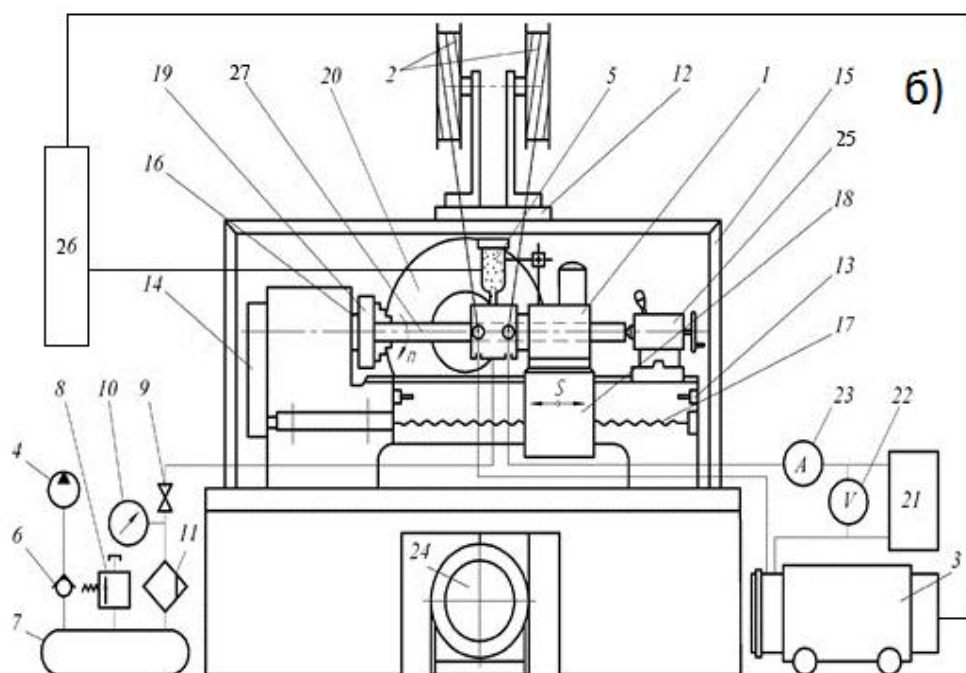
1 – електродуговий металізатор (повернуто на 90° відносно горизонтальної осі X); 2 – дроти; 3 – сопло; 4 – живильник; 5 – дозуюча трубка живильника; 6 – частинки порошку; 7 – струмінь розпилюючого повітря; 8 – електрична дуга; 9 – поверхня деталі, на яку напилюють композиційне покриття.

Подача дротів у розпилюючу головку металізатора здійснюється з котушок, через гнучкі струмоізолювані патрубки та подавальний механізм металізаційного апарату. Сюди ж, до розпилюючої головки, по відповідних системах живлення (кабелями, шлангами) підводять постійний електричний струм та стиснене повітря.

В якості джерела живлення в установці використовується зварювальний перетворювач ПСГ-500. Цей агрегат має жорстку вольтамперну характеристику, забезпечує плавне регулювання напруги холостого ходу ($U_o = 16..40 \text{ В}$) і дозволяє одержувати великі значення сили постійного струму ($I_{\max} = 400 \text{ А}$), для регулювання якого використовується баластний реостат РБ-301. Такі характеристики джерела живлення сприяють високій продуктивності та стабільності процесу напилення покриттів.



a)



б)

Рис. 3.9. Загальний вигляд (а) та схема установки для електродугового напилення композиційних покриттів із матеріалу дротів і порошків (б):

1 – електродуговий металізатор; 2 – котушка для дротів; 3 – джерело струму; 4 – компресор; 5 – порошковий живильник; 6 – зворотній клапан; 7 – ресивер; 8 – запобіжний клапан; 9 – розподільчий кран; 10 – манометр; 11 – маслководовідкремлювач; 12 – підставка для катушок; 13 – кінцевий вимикач; 14 – гітара змінних зубчастих коліс; 15 – захисний кожух; 16 – шпindel; 17 – ходовий гвинт; 18 – супорт; 19 – трикулачковий патрон; 20 – витяжний канал; 21 – баластний реостат; 22 – вольтметр; 23 – амперметр; 24 – вентилятор; 25 – задня бабка; 26 – система автоматизованого керування; 27 – деталь.

Контроль величини електричних параметрів (сили струму і напруги) здійснюється амперметром та двома вольтметрами, один з яких фіксує значення напруги холостого ходу, а другий показує напругу безпосередньо на дузі.

Режими роботи металізатора наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Рекомендовані режими напилення за паспортними даними
електродугового металізатора ЕМ-6

| Матеріал дротів | Діаметр дротів d , мм | Подача дротів S , м/хв | Напруга на дузі U , В | Сила струму дуги I , А | Дистанція напилення L , мм | Тиск повітря P , МПа |
|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Алюміній | 2,0 | 0,7 – 4,5 | 20 – 30 | 25 – 100 | 50 – 90 | 0,45 – 0,6 |
| Сталь | 2,0 | 0,7 – 4,5 | 30 – 35 | 65 – 160 | 100 – 120 | 0,45 – 0,6 |

Стиснене повітря, необхідне для напилення покриттів, подається від окремого компресора СО-7А. Компресор споряджено ресивером, який забезпечує запас повітря та вирівнює його тиск, роблячи його постійним, без пульсації. Для видалення вологи і мастила з розпилюючого повітря останнє пропускається через мастиловодовідокремлювач. Повітряну систему установки оснащено контрольно-регулюючою апаратурою, до складу якої входять: зворотний клапан, регулятор тиску, запобіжний клапан, ротометр, запірний кран та манометри, елементи пневматичної системи, з'єднані між собою за допомогою гумових патрубків.

Установку механізовано: модернізований металізатор встановлено на супорті токарного верстата моделі ТВ-16, який здійснює під час нанесення покриттів поступальний рух подачі вздовж осі циліндричного зразка, який обертається у токарному патроні, закріпленому на шпинделі верстата. Для реверсування подачі використовуються кінцеві вимикачі, встановлені на станині верстата. Конструкція кріплення металізатора на супорті дозволяє виконувати переміщення апарату у поперечному напрямку і регулювати

дистанцію напилення. Це здійснюється за допомогою ходового гвинта поперечного переміщення каретки супорта верстату. Точність відліку величини переміщення забезпечується точністю лімба, встановленого на вихідному кінці гвинта і складає 0,01 мм. Для напилення покриття на деталі типу тіл обертання необхідно задати частоту обертання деталі, а також відносне переміщення металізатора вздовж деталі, яке називається повздовжньою подачею. Налаштовування на необхідні переміщення здійснювали так. Для забезпечення переміщення електродугового металізатора настроювання верстата на вказані рухи проводиться відповідними настроювальними механізмами в ланцюгах головного руху та подачі. Частоту обертання шпинделя, в якому в патроні або в центрах закріплено деталь, здійснюємо виходячи з розрахункової залежності, якою зв'язуються переміщення початкової і кінцевої ланок ланцюга головного руху, а саме

$$n_{e\partial} \rightarrow n_{шп}, \quad (3.8)$$

де $n_{e\partial}$ – частота обертання електродвигуна верстата, хв^{-1} ;

$n_{шп}$ – частота обертання шпинделя з деталлю, хв^{-1} .

В свою чергу, частота обертання шпинделя визначається з виразу

$$n_{шп} = \frac{1000V}{\pi D}, \quad (3.9)$$

де V – лінійна швидкість деталі (10...20), м/хв.;

D – діаметр деталі, мм.

Розраховану таким чином частоту обертання шпинделя коректуємо за паспортними даними верстата.

Далі записуємо рівняння кінематичного балансу ланцюга головного руху, в якому зв'язуються розрахункові переміщення кінематичною залежністю

$$n_{e\partial} \cdot i_{ки} = n_{шп}, \quad (3.10)$$

З рівняння визначимо передавальне відношення органу настроювання. В нашому випадку це буде коробка швидкостей верстата з передавальним відношенням $i_{ки}$.

$$i_{ки} = \frac{n_{шт}}{n_{ед}}. \quad (3.11)$$

За визначеним числовим значенням передавального відношення підбираємо параметри передач, якими здійснюється налаштування коробки швидкостей на задану частоту обертання виробу.

Оскільки зміни частот обертання в верстатній коробці швидкостей використовують ступінчасті шків пасової передачі, то такими параметрами виступають діаметри ведучого та веденого шківів, тобто

$$i_{ки} = \frac{d_1}{d_2} \eta, \quad (3.12)$$

де d_1, d_2 – діаметр ведучого веденого шківа відповідно; η – ККД.

Настроювання ланцюга повздовжньої подачі верстата проводиться за такою розрахунковою залежністю між переміщеннями початкової та кінцевої ланок ланцюга відповідно шпинделя та супорта з металізатором

$$1 \text{ об. шт} \rightarrow S \text{ мм/об}, \quad (3.13)$$

де 1 об. шт – величина розрахункового переміщення початкової ланки ланцюга подач шпинделя;

S – величина розрахункового переміщення кінцевої ланки – супорта з металізатором (0,5...2,5), мм/об шп.

Шпиндель і супорт зв'язані кінематичним ланцюгом, який складається з зубчастих передач з постійним передавальним відношенням, органу настроювання – гітари змінних шестерень та кінематичної пари ходовий гвинт-гайка. Для настроювання кінематичного ланцюга на певну величину подачі необхідно скласти рівняння кінематичного балансу згідно залежності між розрахунковими переміщеннями кінцевих ланок. В нашому випадку рівняння записується таким чином

$$1 \text{ об. шт} \cdot i_{ном} \cdot i_2 \cdot P_{хзв} = S \text{ мм/об}, \quad (3.14)$$

де $i_{ном}$ – передавальне відношення зубчастих передач з постійним передавальним відношенням;

i_z – передавальне відношення гітари змінних шестерень;

P_{xz} – крок різьби ходового гвинта верстату, мм.

З вказаного рівняння при заданій в режимах напилення величині подачі S , знаходимо числове значення передавального відношення гітари змінних зубчастих коліс

$$i_z = \frac{S}{1 \text{ об. шп.} \cdot i_{\text{ном}} \cdot P_{xz}} = \frac{a}{v} \cdot \frac{c}{d}, \quad (3.15)$$

де a, v, c, d – числа зубів коліс гітари.

Далі, за чисельним значенням передавального відношення визначаємо діаметри шківів та числа зубів коліс гітари a, b, c, d , застосовуючи розроблену програму [16] (додаток А).

Основні технічні характеристики установки зведені в табл. 3.3

Таблиця 3.3

Технічна характеристика установки для напилення покриттів

| Показник | Розмірність | Величина |
|----------------------------|--------------------|-----------|
| Потужність джерела струму | кВт | 40 |
| Максимальний робочий струм | А | 500 |
| Максимальна робоча напруга | В | 44 |
| Тиск повітря | МПа | 0,4 – 0,6 |
| Розхід стисненого повітря | м ³ /хв | 0,7 – 1,0 |
| Швидкість подачі дротів | м/хв | 0,7 – 4,5 |
| Діаметр дротів | мм | 1,5 – 2,5 |
| Розмір частинок порошку | мкм | 40 – 100 |
| Подача частинок порошку | кг/год | 0 – 1,0 |
| Частота обертання шпинделя | хв ⁻¹ | 10 – 1000 |
| Величина подачі супорта | мм/об. шп. | 0,1 – 4,0 |

Розрахунок складу композиційних покриттів. Композиційні покриття формували із матеріалу суцільних дротів та порошків, які вводили із живильника в металоповітряний потік. Розрахунок подачі порошку за одиницю часу (кг/год) здійснювали, виходячи із продуктивності електродугового металізатора (кг/год) при напиленні покриття із суцільних дротів та заданої концентрації частинок порошку в композиції.

Для визначення об'єму порошку, який необхідно подати із живильника в металоповітряний потік, скористаємося таким співвідношенням

$$\frac{100}{c_{об}} = \frac{V_M + V_{II}}{V_{II}}, \quad (3.16)$$

де $c_{об}$ – об'ємна концентрація частинок порошку в складі композиційного покриття.

V_M – об'єм матриці покриття, напиленої із матеріалу суцільних дротів;

V_{II} – об'єм частинок порошку в складі композиційного покриття;

Об'єм матриці покриття напиленого із матеріалу суцільних дротів за одиницю часу можна визначити із виразу

$$V_M = \frac{m_M}{\rho_M}, \quad (3.17)$$

де m_m , ρ_m – маса і густина матеріалу матриці відповідно.

Об'єм порошку, який подають із живильника в металоповітряний потік за одиницю часу відповідно

$$V_{II} = \frac{m_{II}}{\rho_{II}}, \quad (3.18)$$

де m_{II} , ρ_{II} – маса і густина матеріалу порошку відповідно.

Підставивши вирази (3.17) (3.18) в (3.16) отримаємо формулу для визначення маси порошку, яку необхідно подати із живильника в металоповітряний потік за одиницю часу

$$m_{II} = \frac{c_{об} \cdot m_M \rho_{II}}{(100 - c_{об}) \rho_M}. \quad (3.19)$$

Експериментально було встановлено, що продуктивність електродугового металізатора ЕМ-6 становить при напиленні покриття із суцільних дротів: алюміній – 1,9 кг/год; сталь – 3 кг/год.

Приклад. Для отримання композиційного покриття з вмістом в його складі $c_{об} = 10\%$ WC зі сталеву матрицею масова подача порошку, обчислена за формулою (3.19) становить $m_n = 0,166$ кг/год.

Коефіцієнт використання матеріалів при електродуговому напиленні композиційних покриттів на плоску поверхню, площа якої в два рази перевищувала площу більшої основи конуса металоповітряного потоку, становив для матеріалу дротів близько 57 %, а для порошоків – 62 %.

Контроль складу отриманого композиційного покриття здійснювали на поперечних мікрошліфах планіметричним методом.

Система автоматизованого керування параметрами технологічного процесу напилення композиційних покриттів. Товщину покриттів, зокрема композиційних, розраховують виходячи з міркувань: створення запасу металу для компенсації спрацювання під час експлуатації, врахування утворення системи ремонту, забезпечення необхідної величини припуску на механічну обробку для отримання необхідної шорсткості та точності розмірів нанесених покриттів.

При формуванні композиційних покриттів необхідної товщини виникає необхідність у періодичних зупинках процесу напилення для проведення проміжного розмірного контролю товщини покриття. Це призводить до погіршення його якості, зниження продуктивності праці, а також пов'язано з певними незручностями під час вимірювань, що спричинені, наприклад, відносно високою температурою вимірювальних поверхонь покриття, незручним доступом до них тощо. З метою запобігання вказаним недолікам нами розроблено удосконалену систему автоматизованого керування

параметрами технологічного процесу електродугового напилення композиційних покриттів на деталях типу тіл обертання на базі пристрою [24].

Для напилення покриття заданої товщини необхідно забезпечити вимірювання товщини його шарів і в залежності від неї включати виконавчі механізми установки для електродугового напилення. Щоб отримати покриття із різними властивостями: із матеріалу дротів або композиційне необхідно, щоб відбувалося плавлення дротів-електродів. Тому в процесі напилення електродуговий металізатор повинен працювати. Склад покриття задають часом включення і виключення порошкового живильника. У випадку напилення покриття із металу дротів живильник взагалі не вмикається. При напиленні композиційного покриття живильник вмикається і вимикається разом із електродуговим металізатором. У випадку напилення двошарового покриття, порошковий живильник вмикається разом із електродуговим металізатором і вимикається при досягненні певної товщини композиційного шару покриття.

Структурна схема системи автоматизованого керування установкою, яка дає можливість напилювати композиційні покриття наведена на рис. 3.10.

Система працює наступним чином. Перетворювач 5 подає на котушку 13 змінну напругу збудження. В котушці 13 виникає магнітне поле, яке через ланку 11 і через деталь 18 замикається. Напрямок магнітного поля вказано штриховою лінією. При замиканні потоку встановлюється якийсь струм в колі котушки 13. Цей струм перетворюється в напругу і подається на вхід компаратора 4. На інший вхід компаратора 4 поступає сигнал вибору товщини магнітного зазору в магнітній ланці. Якщо струм в колі котушки 13 занадто великий, а це станеться тоді коли магнітна ланка замкнена, то компаратор подає сигнал на підсилювач 3 керування соленоїдом 12. Соленоїд зтягує ярмо в середину котушки і в магнітній ланці виникає повітряний прошарок, який збільшує опір у магнітному потоці, і струм в колі котушки 13 зменшиться до рівня, який відповідає заданому сигналом зазору. Екран 17 служить для захисту вузла контролю розмірів деталі 18. При зміні розміру деталі 18 в результаті

напилення і фіксованому зазору в магнітній ланці для керування соленоїдом потрібна різна напруга. Тому напруга на виході підсилювача 3 є функцією діаметра деталі 18.

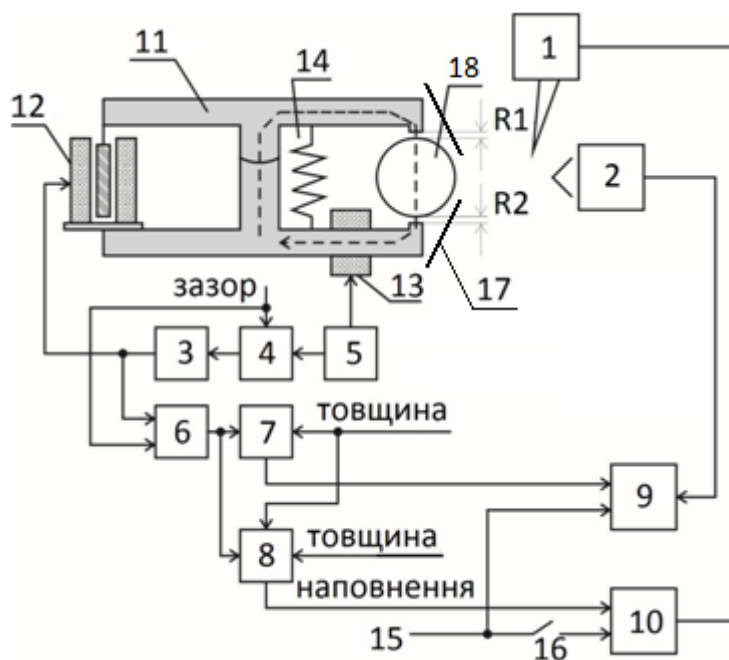


Рис. 3.10. Структурна схема системи автоматизованого керування параметрами технологічного процесу електродугового напилення композиційних покриттів:

1 – порошковий живильник із дозуючою трубкою; 2 – електродуговий металізатор; 3 – підсилювач сигналу керування; 4 – компаратор; 5 – перетворювач напруга – струм; 6 – різницевий підсилювач; 7 і 8 – компаратори; 9 – тригер керування металізатором; 10 – тригер керування живильником; 11 – складова частина магнітної ланки; 12 – соленоїд керування притисканням; 13 – котушка збудження магнітного потоку; 14 – притискаюча пружина; 15 – вхід сигналу початку роботи; 16 – ключ; 17 – екран; 18 – деталь.

Для того, щоб розмір зазору не впливав на сигнал в різницевому підсилювачі 6 віднімається сигнал, пропорційний зазору і сигнал керування соленоїдом, так, що на початок роботи на виході блоку 6 буде нульовий сигнал. По мірі зростання розміру деталі 18 для утримання заданого зазору в магнітній

ланці необхідна буде більша напруга на соленоїді. Відповідно на виході блоку 6 буде більший сигнал.

Сигнал з блоку 6 є керуючим для закінчення процесу напилення. Він порівнюється компаратором 7 із наперед заданим сигналом, що визначає товщину покриття. Також компаратором 8 цей сигнал порівнюється із наперед заданим сигналом товщини порошкового шару.

Отже перед початком напилення включається система і за допомогою сигналу задається розмір зазору в магнітній ланці. Потім за допомогою щупів, які закладаються в зазор між деталлю і вузлом контролю розміру підбирається сигнал, який задає загальну товщину напиленого покриття. Згідно потреби виставляється відсоткове значення товщини електродугового композиційного покриття сигналом товщина напилення. Тобто скільки відсотків від загальної товщини займе композиційний шар покриття.

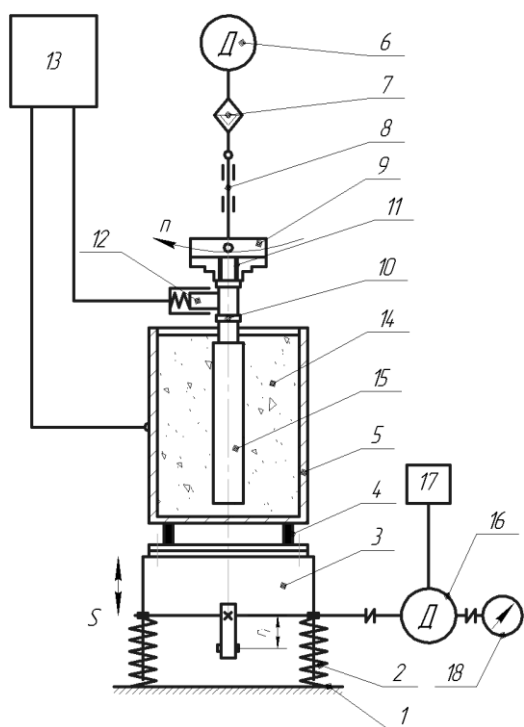
Після цих установок ключем 16 встановлюється товщина необхідного композиційного шару і сигналом 15 запускається процес електродугового напилення. При досягненні заданого розміру деталі з напиленням в залежності від виставлених сигналів товщин, процес напилення автоматично припиняється.

Таким чином, запропонована система дозволяє автоматизувати як контроль розмірів покриття, так і процес його нанесення, що в свою чергу покращує якість сформованих шарів на поверхні деталей методом електродугового напилення, а також забезпечує підвищення продуктивності.

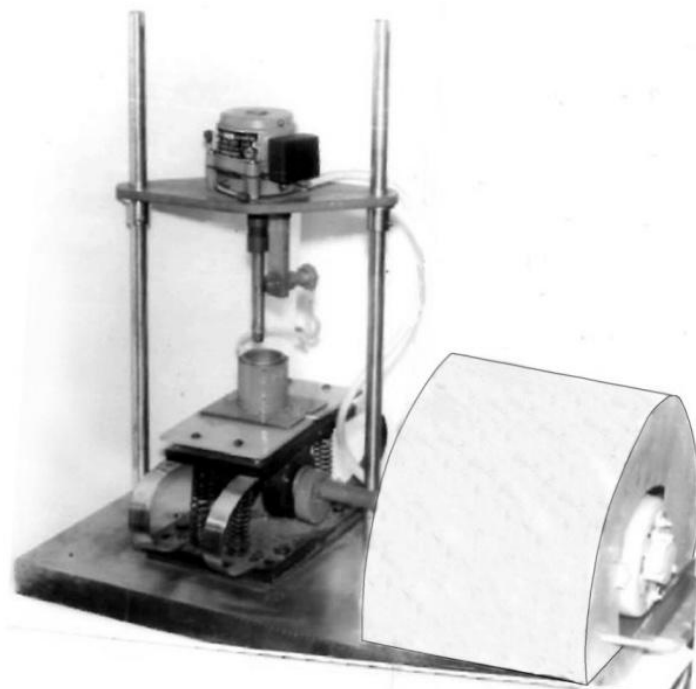
3.3.2. Модернізація установки для віброелектроіскрового легування.

Для формування композиційних покриттів комплексним методом (поєднання електродугового напилення та віброелектроіскрового легування) нами модернізовано експериментальну установку для віброелектроіскрового легування конструкції кафедри технології нафтогазового машинобудування ІФНТУНГ (рис. 3.11). Цю установку використовували як для підготовки поверхні перед напиленням композиційних покриттів (Пат. 67165) [15, 21, 25],

так і для зміцнення верхнього технологічного шару напиленого покриття після механічної обробки. Віброелектроіскрове легування використовували також для нанесення нікелю на поверхню гранул твердого сплаву, який застосовувався для об'ємного і поверхневого армування породоруйнівних елементів бурових доліт.



а)



б)

Рис. 3.11. Схема (Патент № 67165) (а) і загальний вигляд установки для віброелектроіскрового легування (б).

В цій установці вдосконалено джерело живлення, яке забезпечує узгоджене подавання імпульсів розряду з певним положенням вібруючого контейнера з гранулами, а також споряджено модулем обертання деталі. Установка складається з таких основних модулів та блоків: модуля джерела технологічного струму з блоком керування установкою; модуля обертання деталі; вібраційного модуля з контейнером для гранул; блоком контрольно-вимірвальних приладів.

Джерело технологічного струму побудовано за схемою RC-генератора і дає можливість роздільного регулювання енергії та частоти поступлення імпульсів. Наявність в ланцюгу розрядного контуру тиристорного ключа реалізує примусовий імпульсний характер процесу. Останнє є необхідною умовою для розроблення параметрів технологічного процесу. Розроблений RC-генератор забезпечує незалежне регулювання технологічних параметрів у широкому діапазоні та дозволяє тривале легування поверхонь деталей в режимі «короткого замикання».

Основні технічні характеристики установки зведені в табл. 3.4

Установка працює наступним чином: електропровідні гранули завантажують в металевий контейнер-електрод 5, джерелом вібрації служить вібратор 3, деталь 15 кріпиться на оправці 10, яка встановлюється через електроізоляційну втулку 11 в патроні 9, змонтованому на шпинделі 8. Оправка 10 служить для подачі напруги на деталь 15, що кріпиться на ній, та підключається до негативного полюса джерела живлення 13 через ковзаючий струмопідвід 12, а металевий контейнер-електрод 5 – відповідно до позитивного полюса.

Приводний електродвигун 16 має блок регулювання частоти обертання 17 і приводить в рух вібратор 3, який передає коливання контейнеру-електроду 5. Частоту обертання електродвигуна 16 контролюють тахометром 18. Деталь 15 обертають приводним електродвигуном 6. Регулювання частоти обертання деталі 15 здійснюється за допомогою органу настроювання 7 частоти обертання шпинделя 8. При плоскій формі деталі обертовий рух відсутній. Деталь 15 є фактично зануреною у середовище вібруючих електропровідних гранул 14, які утворюють киплячий шар.

Далі вмикають джерело технологічного струму 13. В результаті виникнення при цьому іскрових розрядів між електропровідними гранулами 14 і поверхнею деталі 15 здійснюється перенесення матеріалу з вібруючих гранул на поверхню, що легують. Легований шар міцно з'єднаний з основою.

Віброелектроіскровий спосіб нанесення покриттів характеризується підвищеною продуктивністю, дозволяючи проводити одночасно обробку всієї поверхні деталі, в тому числі і складної форми, без додаткових переустановок.

Контроль якісних параметрів композиційних покриттів здійснювали за такими показниками: за зовнішнім виглядом, за товщиною покриття та міцністю його зчеплення з основним металом, точністю розмірів та шорсткістю поверхонь оброблених різанням. Контролю за зовнішнім виглядом підлягали 100 % зразків.

Таблиця 3.4

Технічна характеристика установки для віброелектроіскрового легування

| Показник | Розмірність | Величина |
|--|-----------------|-------------|
| Загальна потужність | кВт | 1,5 |
| Робочий струм | А | 1 – 10 |
| Початкова напруга розряду | В | 20 – 100 |
| Ємність конденсаторної батареї джерела живлення | мкФ | 50 – 300 |
| Частота проходження імпульсів у режимі «короткого замикання» | Гц | 10 – 2000 |
| Амплітуда вертикальних коливань контейнера | мм | 0,5 – 3,0 |
| Частота обертання зразка | с ⁻¹ | 0,04 – 2,00 |

3.4. Розробка групового технологічного процесу формування композиційних покриттів комплексним методом

Деталі для проектування групового технологічного процесу класифікували за типом застосовуваного обладнання для виконання основних операцій. Розроблений технологічний процес формування композиційних покриттів

комплексним методом здійснюють за послідовним, паралельним або послідовно-паралельним маршрутом. Вибір маршруту залежить від будови композиційного покриття (рис. 3.12), яка визначає його функціональне призначення та умови експлуатації деталей.

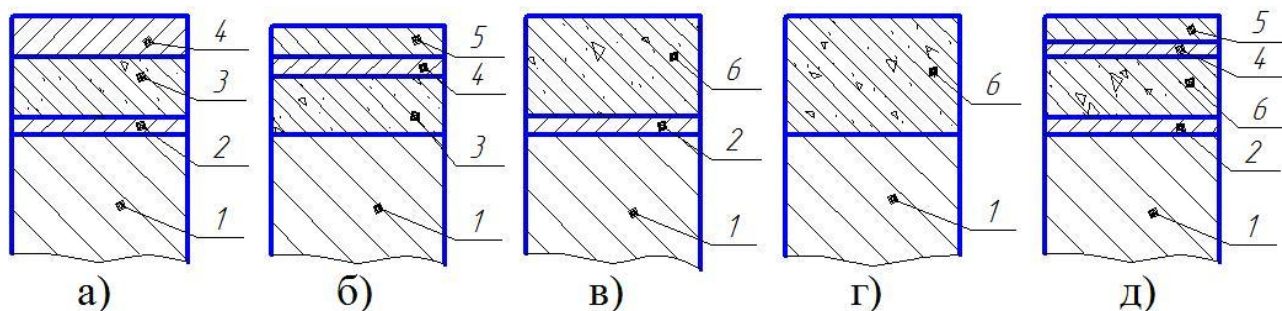


Рис. 3.12. Варіанти будови композиційних покриттів, сформованих комплексним методом послідовної дії (а, б), послідовно-паралельної дії (в), паралельної дії (г) та послідовно-паралельно- послідовної дії (д):

1 – основа; 2 – підшар покриття, сформований віброелектроіскровим легуванням; 3 – композиційний шар покриття, сформований електродуговим напиленням із суцільних дротів та порошоків; 4 – технологічний шар покриття, сформований тільки з суцільних дротів; 5 – верхній шар покриття, сформований віброелектроіскровим легуванням; 6 – композиційний шар покриття, сформований одночасним електродуговим напиленням з суцільних дротів та порошоків і легуванням.

На рис. 3.13 представлено блок-схему комбінованого технологічного процесу формування композиційних покриттів на деталях типу тіл обертання.

Вказані покриття можна формувати за такими варіантами маршрутів, виходячи із блок-схеми технологічного процесу для виготовлення деталей класу тіл обертання зі зміцненням покриттями їх робочих поверхонь, наприклад захисних втулок валів відцентрових насосів, ніпеля та муфти бурових замків тощо. Реалізація розробленого комбінованого технологічного процесу потребує застосування спеціального обладнання.

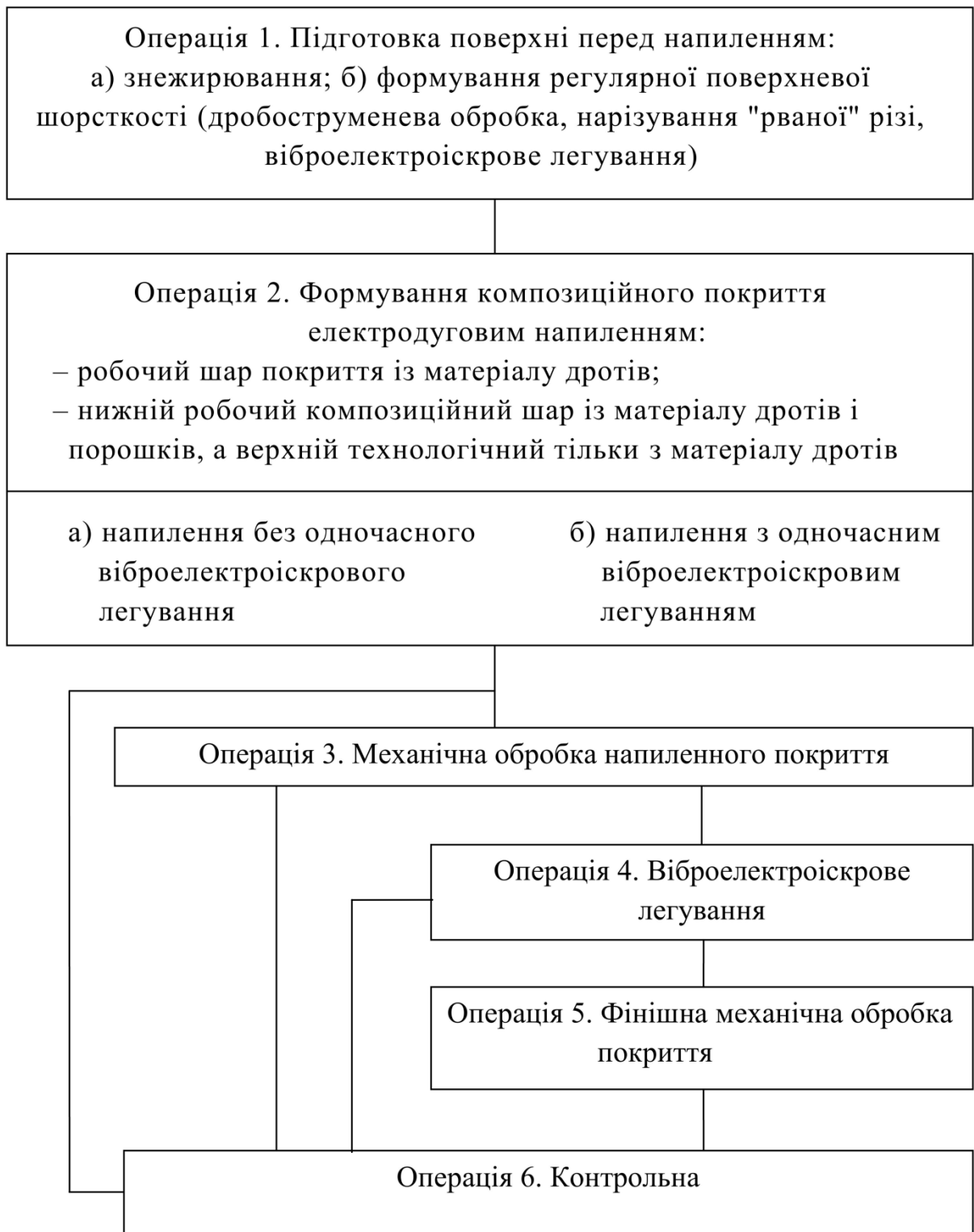


Рис. 3.13. Блок-схема групового комбінованого технологічного процесу формування композиційних покриттів комплексним методом.

3.5. Методика обробки результатів досліджень і планування експерименту

3.5.1. Математична обробка результатів дослідження шорсткості покриттів. При графічному аналізі кореляційного поля експериментальних даних показника шорсткості в залежності від товщини знятого механічною обробкою шару покриття встановлено, що шукана залежність матиме явно виражений нелінійний характер [113]. Для виявлення характеру зв'язку між вказаними факторами і побудови рівняння, що аналітично описуватиме основну тенденцію цієї залежності, скористаємося методами регресійного аналізу (додаток Б).

3.5.2. Планування технологічних експериментів. Досліджують технологічний процес формування композиційних покриттів комбінованим методом (віброелектроіскрове легування основи, наплавлення робочого шару з одночасним армуванням гранулами реліту). Для армування використовують гранули реліту з умовним діаметром 0,4–1,6 мм, які в одній із серій дослідів легували нікелем для запобігання їх інтенсивному розчиненню в розтопленій сталі. Щоб визначити вплив технологічних параметрів процесу формування наплавленого композиційного покриття на величину зношування зубців бурового долота y використовують такі фактори: X_1 – кут загострення зубця (30–60 град); X_2 – умовний діаметр гранул реліту (0,4–1,6 мм); X_3 – температура підігріву основи (580–650 °С); X_4 – заокруглення вершини зубця (0,5–1,5 мм). Для опису зношування наплавлених зубців в залежності від параметрів технологічного процесу застосовують лінійну модель (y , y_n – зношування зубців наплавлених нелегованими і легованими нікелем гранулами реліту відповідно, мм)

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i; \quad y_{\text{л}} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i, \quad (3.20)$$

де b_0 – вільний член рівняння; b_i – коефіцієнти регресії; x_i – кодове значення фактора; $k = 4$ – кількість факторів.

Для повнофакторного експерименту при $k = 4$ проводять 16 дослідів на верхніх і нижніх рівнях факторів (додаток Б). Кожен дослід при випробовуваннях на зношування зразків повторюють три рази на установці [37]. Обробку результатів досліджень, розрахунок коефіцієнтів регресії, оцінювання їх значущості та адекватності моделі проводять за стандартною методикою [127]. Розрахунки здійснюють у програмному середовищі STATISTICA.

3.6. Висновки до розділу

1. Обґрунтовано вибір матеріалів, порошоків, дротів та методик дослідження впливу параметрів технологічного процесу на експлуатаційні властивості деталей з покриттями.

2. Розроблено установку та систему автоматизованого керування параметрами технологічного процесу електродугового напилення композиційних покриттів із матеріалу дротів та порошоків, які вводять із живильника в металоповітряний потік.

3. Модернізовано установку та розроблено методику віброелектроіскрового легування основи та покриття.

4. Розроблено груповий технологічний процес формування композиційних покриттів комплексним методом.

5. Розроблено методику обробки результатів дослідження шорсткості покриттів та планування технологічного експерименту, для проведення повнофакторного експерименту 2^4 з метою визначення залежності зносостійкості наплавлених шарів як нелегованими, так і легованими нікелем гранулами реліту від технологічних параметрів.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ КОМПЛЕКСНИМ МЕТОДОМ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ

4.1. Технологічне обґрунтування складу композиційних покриттів і вплив технологічних параметрів процесу електродугового напилення композиційних покриттів на їх властивості

Композиційні покриття отримують різноманітними методами [38, 39, 43–45, 52–54, 57, 58, 66, 70, 128] зокрема електродуговою металізацією із порошкових дротів [45, 50, 53, 55] або з суцільних дротів [50, 53], в тому числі з різних матеріалів [45, 50, 53]. Ці покриття характеризуються постійною концентрацією складових за їх товщиною і при вмісті в складі таких покриттів твердих частинок їх важко обробляти лезовим або абразивним різальним інструментом [106, 110, 111]. Тому нами розроблено груповий технологічний процес формування композиційних покриттів ЕДМ із матеріалу суцільних дротів-електродів та частинок порошків, які вводять у металоповітряний потік із живильника, що дозволяє напилювати робочий нижній шар покриття із матеріалу дротів та порошків, а верхній – тільки з матеріалу дротів.

Для формування таких покриттів необхідно було обґрунтувати технологічні параметри: концентрацію частинок порошку, які вводять у металоповітряний потік при електродуговому напиленні, місце розташування дозуючої трубки живильника і початкову швидкість введення частинок порошку, напругу, силу струму дуги [2, 3, 6, 17, 20, 23, 26]. Матрицею для формування композиційних покриттів було вибрано дроти із алюмінію та сталі. Для цих дротів діаметром 2 мм рекомендовано технологічні режими роботи електродугового металізатора ЕМ-6, які наведені в табл. 3.1.

Досліджували формування композицій: матриця із сталевих дротів з частинками карбідів титану або вольфраму і матриця з алюмінієвих дротів з частинками титану або молібдену. Місце введення і початкову швидкість введення порошків із живильника через дозуючу трубку в металоповітряний потік розраховували за методикою, наведеною в розділі 2.

Відомо, що у композиційних матеріалах зазвичай приймають таке співвідношення компонентів: наповнювач – до 60 %, решта – матриця [37, 129]. В літературі нам не зустрічалися дані про вміст частинок порошку при формуванні композиційних покриттів електродуговим методом, а розрахувати теоретично концентрацію складно, тому величину концентрації обґрунтовували експериментально, ставлячи обмеження на її величину для забезпечення стабільності горіння електричної дуги між дротами-електродами металізатора. Частинки порошків вводили у металоповітряний потік із живильника через дозуючу трубку для отримання композиційних покриттів з різною концентрацією наповнювача [10, 14]. За характером горіння електричної дуги металізатора спостерігали візуально з використанням світлозахисної маски для виконання зварювальних робіт, а також використовували фотофіксацію.

Процеси, які проходять в дузі підчас ЕДМ мало чим відрізняються від процесів в дуговому розряді. Основна відмінність заключається в тому, що при ЕДМ на дугу діє стиснене повітря, яке дещо видовжує її та переносить краплини з розтопленого матеріалу дротів-електродів та частинки порошку, які вводять із живильника, на поверхню деталі. Як показують результати проведених нами досліджень, порошкові матеріали спричиняють вплив на стабільність горіння електричної дуги. Так, введення в зону дугового розряду частинок титану або молібдену сприяє зростанню величини струму на дузі зі збільшенням їх відсоткового вмісту в складі композиційного покриття, а напруга струму падає в 1,25 – 1,3 рази (табл. 4.1). При цьому напругу холостого ходу встановлюють як і для звичайного процесу ЕДМ, оскільки процес наплення починається із загорання дуги між дротами-електродами.

Також було встановлено, що оптимальне значення концентрації частинок даних металів в алюмінієвій матриці складає 20...22 %. Перевищення цього показника викликає нестійкість процесу горіння дуги, або навіть її гасіння, а сформовані в таких умовах покриття мають велику кількість нетоплених частинок порошку.

Таблиця 4.1

Вплив концентрації металевих порошків титану та молібдену на процес горіння електричної дуги при електродуговому напиленні композиційних покриттів з використанням алюмінієвих дротів

| Показники | Концентрація частинок порошку металу в покритті, % | | | | | |
|-----------------------|--|------------|-------------------------|--------------|--------------------------|------------------------------------|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20–22 | >23 |
| | Матеріал частинок порошку – Ti | | | | | |
| Напруга, В | 28 | 28 | 26 | 24 | 22 | - |
| Характер горіння дуги | Стабільний | Стабільний | Незначна нестабільність | Нестабільний | Зростання нестабільності | Суттєво нестабільна, згасання дуги |
| | Матеріал частинок порошку – Mo | | | | | |
| Напруга, В | 28 | 28 | 26 | 23 | 21 | - |
| Характер горіння дуги | Стабільний | Стабільний | Незначна нестабільність | Нестабільний | Зростання нестабільності | Суттєво нестабільна, згасання дуги |

Аналізуючи дані отримані при напиленні сталевих покриттів з вмістом карбідів (табл. 4.2), спостерігаємо практично незмінний характер перебігу горіння дуги при незначних концентраціях частинок карбідів (до 10 %) в її зоні.

Зростання концентрованих частинок в дузі до 15 % призводить до дестабілізації процесу її горіння. В більшій мірі це стосується карбіду титану, ніж карбіду вольфраму, і може пояснюватися різними величинами питомого електричного опору матеріалів. Для карбіду титану вона складає $\rho = 52,5$ мк·Ом·см, а для карбіду вольфраму – $\rho = 19,2 \pm 0,3$ мк·Ом·см [121, 122].

Таблиця 4.2

Вплив концентрації частинок порошку карбіду титану та вольфраму на процес горіння електричної дуги при напиленні композиційних покриттів з використанням сталевих дротів

| Показники | Концентрація частинок порошку карбіду в покритті, % | | | | | |
|-----------------------|---|------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------------|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 17 | більше 17 |
| | Матеріал частинок порошку TiC | | | | | |
| Напруга дуги, В | 30 | 32 | 35 | 38 | 40 | - |
| Характер горіння дуги | Стабільний | Стабільний | Ознаки нестабільності | Нестабільний | Зростання нестабільності | Суттєво нестабільна, згасання дуги |
| Напруга дуги, В | Матеріал частинок порошку WC | | | | | |
| | 30 | 32 | 34 | 36 | 39 | - |
| Характер горіння дуги | Стабільний | Стабільний | Незначні ознаки нестабільності | Ознаки нестабільності | Зростання нестабільності | Суттєво нестабільна гасіння дуги |

Подальше збільшення концентрації карбідів в складі композиційного покриття призводить до суттєвої нестабільності процесу горіння дуги, а при значеннях більше 17 % – до її згасання. Тому для забезпечення отримання композиційних покриттів із вмістом карбідів титану і вольфраму до 17 % при стійкому горінні дуги процес електродугового напилення необхідно проводити

при збільшенні сили електричного струму дуги в 1,20...1,25 рази у порівнянні з паспортними даними металізатора та напруги в 1,3 рази.

Типова будова покриття напиленого електродуговим методом за розробленою технологією представлена на рис 4.1 (x100). Нижній робочий композиційний шар складається з матеріалу дротів та частинок порошку WC, а верхній технологічний шар – тільки з матеріалу дротів, що підлягає подальшій механічній обробці.

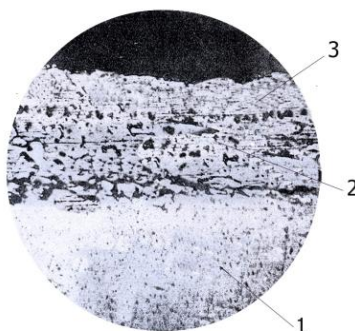


Рис. 4.1. Мікроструктура напиленого покриття:

1 – основа; 2 – робочий композиційний шар; 3 – верхній технологічний шар.

Результати виконаних досліджень ілюструються графічними залежностями. На рис. 4.2, а показано, що для композиційних покриттів сталь-TiC та сталь-WC із зростанням вмісту в їх складі порошкової складової величина сили струму дуги спадає, а напруга зростає (табл. 4.2), що при певних значеннях вказаних характеристик може призвести до згасання дуги. Тому для забезпечення стабільності процесу ЕДМ, як вже відзначалось вище, необхідно напилення таких покриттів виконувати на підвищених режимах.

Зворотні тенденції спостерігаються для композиційних покриттів системи Al-Mo або Al-Ti. При їх напиленні, як видно з графіків (рис. 4.2, б), значення сили струму зростає, а напруга на дузі – навпаки спадає (табл. 4.3). Така залежність зберігається до тих пір, поки величина концентрації порошкових частинок в складі композиції не перевищить 20 – 22 %, за межами якої починаються процеси нестабільного горіння дуги та, як один із варіантів цієї нестабільності – згасання дуги.

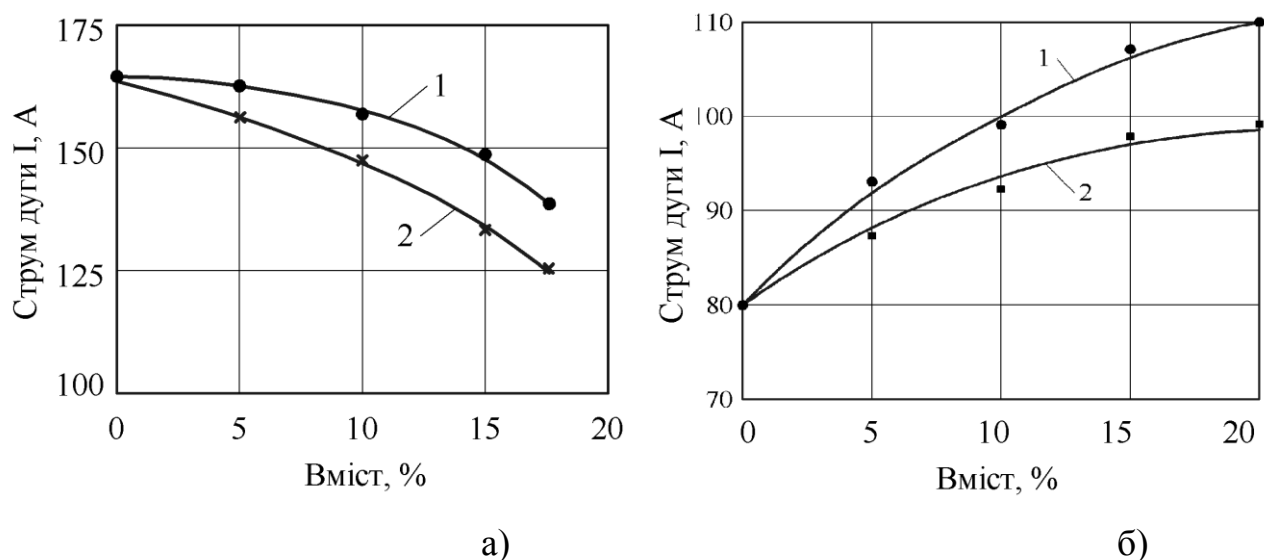


Рис. 4.2. Вплив вмісту частинок порошку в складі композиційного покриття на силу струму дуги:

а) 1 – покриття сталь + WC; 2 – покриття сталь + TiC; б) 1 – покриття Al + Ti; 2 – покриття Al + Mo.

На основі визначених технологічних параметрів, які забезпечують стабільні умови формування композиційних покриттів із зазначеними складовими, було проведено експериментальне дослідження впливу їх складу та режимів ЕДМ, таких як сила струму та напруга на дузі, дистанція напилення та товщина нанесених шарів на міцність їх зчеплення зі сталеву основою.

На рис. 4.3 показано вплив на вказаний показник концентрації частинок порошків. Як бачимо, із збільшенням вмісту карбідів в сталевій матриці покриття міцність зчеплення знижується. Для композиційних покриттів із вмістом титану та молібдену в алюмінію залежність, що вивчається, при значеннях їх вмісту до 18 % зростає, а з подальшим збільшенням порошкових складових спадає.

Вплив електричних параметрів горіння дуги при подачі порошків карбідів TiC та WC в складі сталевій матриці та металів Ti і Mo в алюмінієвій матриці на міцність зчеплення покриттів з основою представлено графічними залежностями на рис. 4.4 а, б. Аналізуючи їх, можемо зробити висновок, що із

зростанням сили струму на дузі (напруги) сила зчеплення композиційних покриттів з основою зменшується.

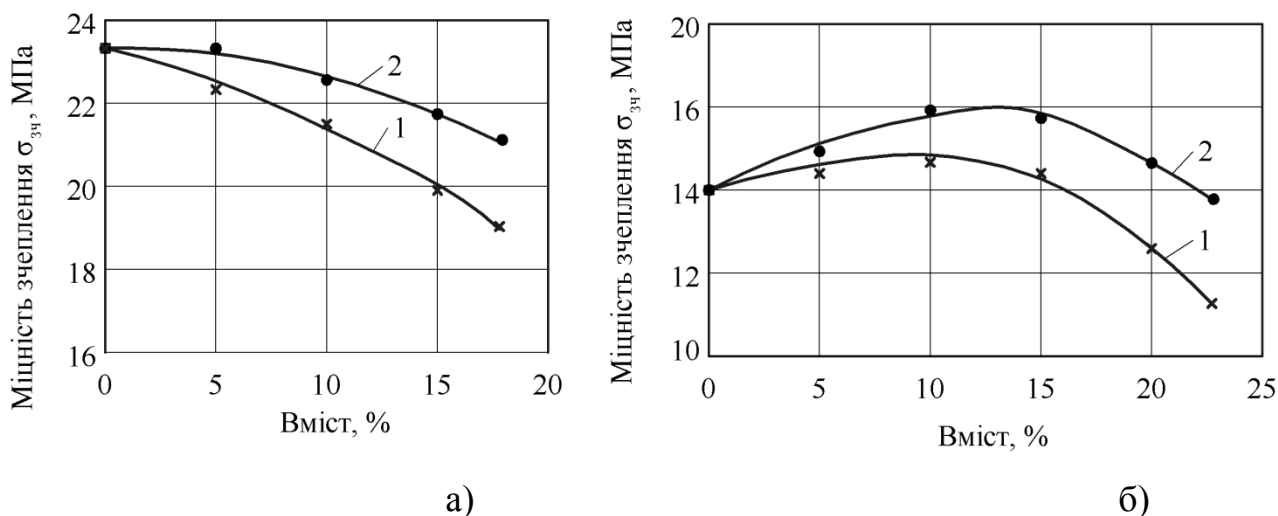


Рис. 4.3. Залежність міцності зчеплення композиційного покриття з сталеву основою від вмісту частинок порошку:

а) 1 – покриття сталь + WC; 2 – покриття сталь + TiC; б) 1 – покриття Al + Ti; 2 – покриття Al + Mo.

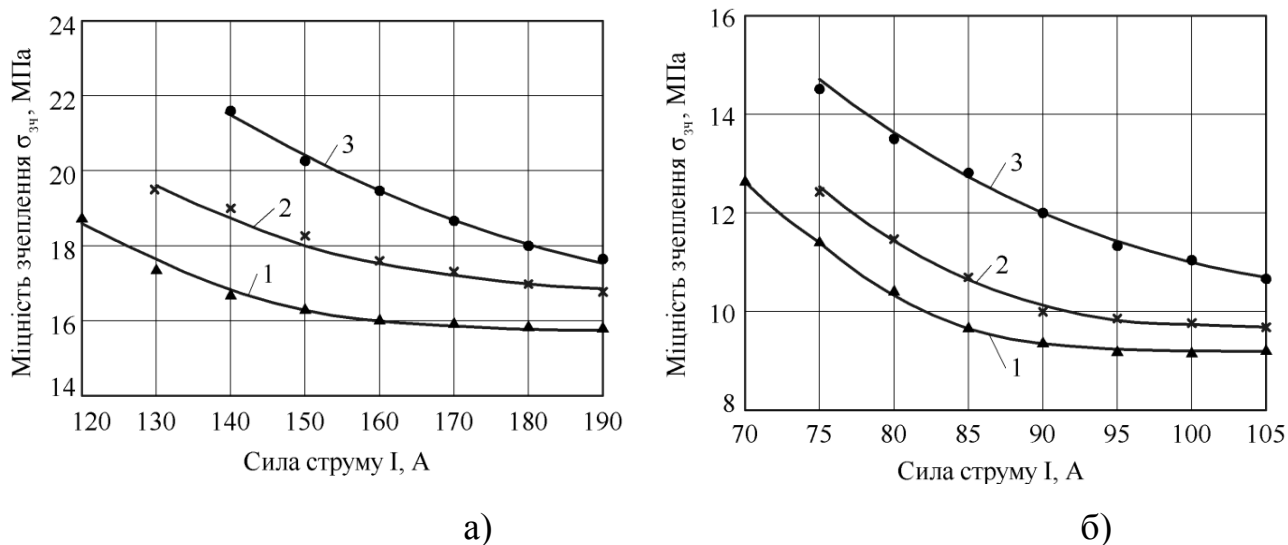


Рис. 4.4. Залежність міцності зчеплення покриттів з сталеву основою від величини сили струму дуги:

а) 1 – покриття зі сталі; 2 – покриття сталь + 17% WC; 3 – покриття сталь + 17% TiC; б) 1 – покриття з Al (алюмінію); 2 – покриття Al + 20% Ti; 3 – покриття Al + 20% Mo.

Вказана тенденція спостерігається, як для звичайних покриттів з дротів-електродів, так і для композиційних покриттів. Загальною причиною такого характеру отриманих залежностей можна вважати збільшення середнього розміру частинок матричних матеріалів (сталі, алюмінію), що розпилюються із суцільних дротів, які складають основну частку складу композиційних покриттів. Збільшення розмірів розпилювальних частинок призводить до зменшення співвідношення площі контакту частинок з основою, та загальної площі частинки, що призводить до зменшення міцності зчеплення сформованих шарів покриття з основою. Значення даного параметру для композиційних шарів вища, ніж для звичайних, що можна пояснити зростанням кінетичної енергії металоповітряної суміші у зв'язку із тим, що частинки порошоків попадають в неї з початковою швидкістю.

Характер впливу дистанції напилення на міцність зчеплення з основою напилених покриттів із суцільних дротів та композиційних покриттів має екстремальні значення для всіх вказаних різновидів покриттів (рис.4.5, а, б). Із збільшенням дистанції напилення в межах 90-110 мм міцність зчеплення спочатку зростає, а потім починає зменшуватися, що пояснюється зменшенням кінетичної енергії частинок, що розпилюються, та зниженням їх температури. Дані параметри суттєво впливають на силу удару частинок, ступінь їх деформації та якість взаємодії з матеріалом основи.

Дослідження залежності міцності зчеплення від товщини композиційних покриттів показало, що зі збільшенням їх товщини міцність зчеплення зменшується. Спільним фактором, що викликає таку тенденцію зміни даного показника, є зростання внутрішніх напружень в покритті із ростом його товщини. Однак цей фактор діє по-різному в різних за складом покриттях, що пояснюється передусім взаємовідмінністю коефіцієнтів термічного розширення α напилюваних матеріалів та основи. Так, в композиціях сталь-карбід металу (рис. 4.6, а) більші значення адгезії покриттів отримуємо для шарів сталь-WS, далі ідуть сталь-TiC та покриття зі сталі з дротів-електродів. Відповідно, коефіцієнти термічного розширення є для сталі $\alpha=11,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, карбіду

вольфраму $\alpha=3,84 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, карбиду титану – $7,0 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Як бачимо, карбіди вольфраму та титану мають менші значення α , і тому їх присутність в композиційних шарах дещо зменшує величину внутрішніх напружень, спричиняючи підвищенню міцності зчеплення з основою у порівнянні із сталевими покриттями.

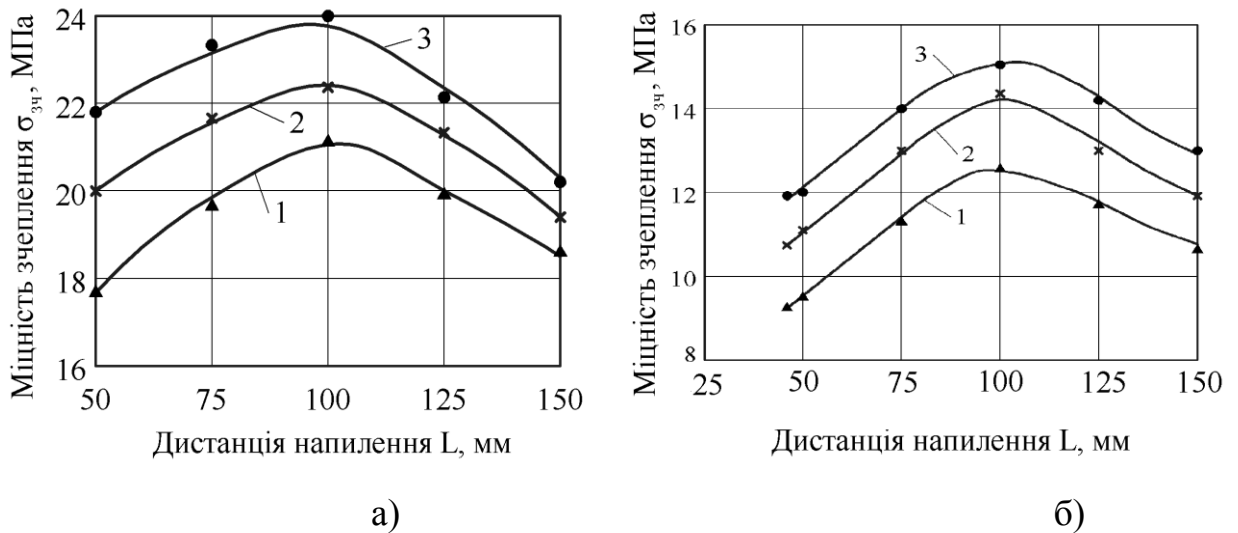


Рис. 4.5. Вплив дистанції напilenня на міцність зчеплення композиційних покриттів з сталеву основою:

- а) 1 – покриття зі сталі; 2 – покриття сталь + 17% WC; 3 – покриття сталь + 17% TiC; б) 1 – покриття з Al (алюмінію); 2 – покриття Al + 20% Ti; 3 – покриття Al + 20% Mo.

Так само можна пояснити вигляд кривих залежності міцності зчеплення від товщини для композицій Al+20%Mo та Al+20%Ti, які напilenі на сталеву основу (рис.4.6, б). Коефіцієнти термічного розширення зазначених матеріалів мають значення: для алюмінію $\alpha=12,1 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, для молібдену $\alpha=5,49 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, для титану $\alpha=7,47 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Відповідно, найбільшу міцність зчеплення отримано для композиційних покриттів з частинками молібдену, а найменшу для покриттів з чистого алюмінію.

Спільний аналіз результатів наведених на рис. 4.6 показав, що введення частинок порошку в склад композиційних покриттів призводить до зростання міцності зчеплення на 8...10 %.

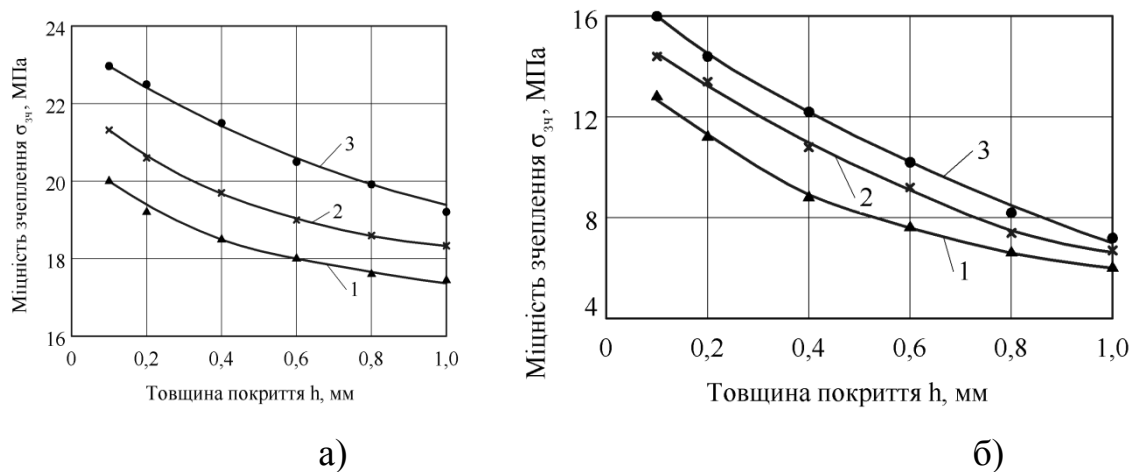


Рис. 4.6. Залежність міцності зчеплення напилених композиційних покриттів з сталеву основою від їх товщини:

- а) 1 – покриття зі сталі; 2 – покриття сталь + 17% WC; 3 – покриття сталь + 17% TiC; б) 1 – покриття з Al (алюмінію); 2 – покриття Al + 20% Ti; 3 – покриття Al + 20% Mo.

При вивченні впливу технологічних параметрів процесу на міцність зчеплення напилених композиційних покриттів нами було досліджено фактор впливу на даний показник підшарів з певних матеріалів, які в силу своїх фізико-хімічних властивостей мають досить високу адгезію з основою та з напиленими покриттями. В основі вибору матеріалу підшару лежать такі параметри [108], як задовільне змочування ними матеріалів основи та напилюваного покриття, можливість виникнення мікрозварних та хімічних зв'язків між ними, наявність, хоча частково, властивостей відновлювати оксиди вказаних матеріалів, невисокий модуль пружності, достатню міцність, що забезпечують оптимальні пружно-пластичні властивості перехідної зони та її міцність. Матеріалами підшарів є нікель, молібден, вольфрам, ніхром, нержавіюча сталь, легкоплавкі метали.

Підшари наносять, як правило, на спеціально підготовлену поверхню механічною обробкою [55, 64, 123, 130], перед напиленням покриттів такими методами: газотермічним напиленням [50], плакуванням, термодифузійним

насиченням із рідиннометалевої фази, гальванічним [64], електроіскровим легуванням [50].

Серед цих наведених методів віброелектроіскрове легування є досить перспективним методом [15, 21, 25]. Воно дозволяє формувати міцно з'єднані з основою шари(і тому числі і загартованою), не вимагає спеціальної попередньої підготовки поверхні основи і не складний в практичній реалізації (рис. 4.7).

Проведені в цьому напрямку досліді з підшарами молібдену, нанесеними на поверхні зразків методом віброелектроіскрового легування в середовище гранул та без нього, показали більшу ефективність підготовки поверхні зразків нанесенням молібденового підшару. Міцність зчеплення композиційних покриттів сталь + 10 % WC, нанесених на підшар молібдену, була приблизно більша на 18 % у порівнянні з тими ж покриттями, нанесеними на поверхню зразків, підготовлену дробоструминевою обробкою без підшару молібдену. Таке зростання можна пояснити створенням на поверхні молібдену розвиненої шорсткої поверхні, яка сприяє підвищенню міцності зчеплення, а також утворенням мікрозварних зв'язків з ним матеріалу частинок напиленого композиційного покриття, що ще більше підвищує адгезійну міцність напилених шарів.

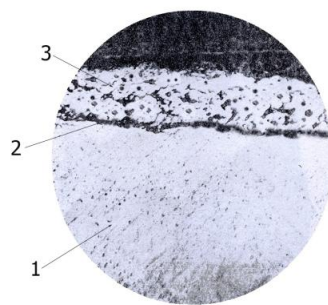


Рис. 4.7. Мікроструктура композиційного покриття сформованого комплексним методом:

1 – основа; 2 – підшар, отриманий віброелектроіскровим легуванням; 3 – робочий композиційний шар.

Мікротвердість поверхневих шарів зразків після віброелектроіскрового легування значно перевищує мікротвердість основи, що створює передумови

для підвищення зносостійкості робочих поверхонь, що співпадає з результатами робіт [100, 101].

Досліди з вивчення мікротвердості покриттів, сформованих ВЕІЛ, проводили за таких режимів: час обробки $\tau=10$ хв, напруга початку розряду $U=70$ В, ємність конденсаторної батареї $C=300$ мкФ.

Для вивчення мікротвердості напилених покриттів були виготовлені мікрошліфи. Результати металографічного аналізу сталевих зразків з суцільного металу та з напиленими покриттями показують, що після ВЕІЛ в середовищі гранул твердих сплавів Т15К6 або ВК8 на них утворюється «білий шар», аналогічно як і при механічній обробці [131] та перехідна зона. Як видно з графіків (рис. 4.8), мікротвердість покриттів за товщиною коливається в досить широких межах, із загальною тенденцією до зменшення у напрямку від поверхні в товщу покриття.

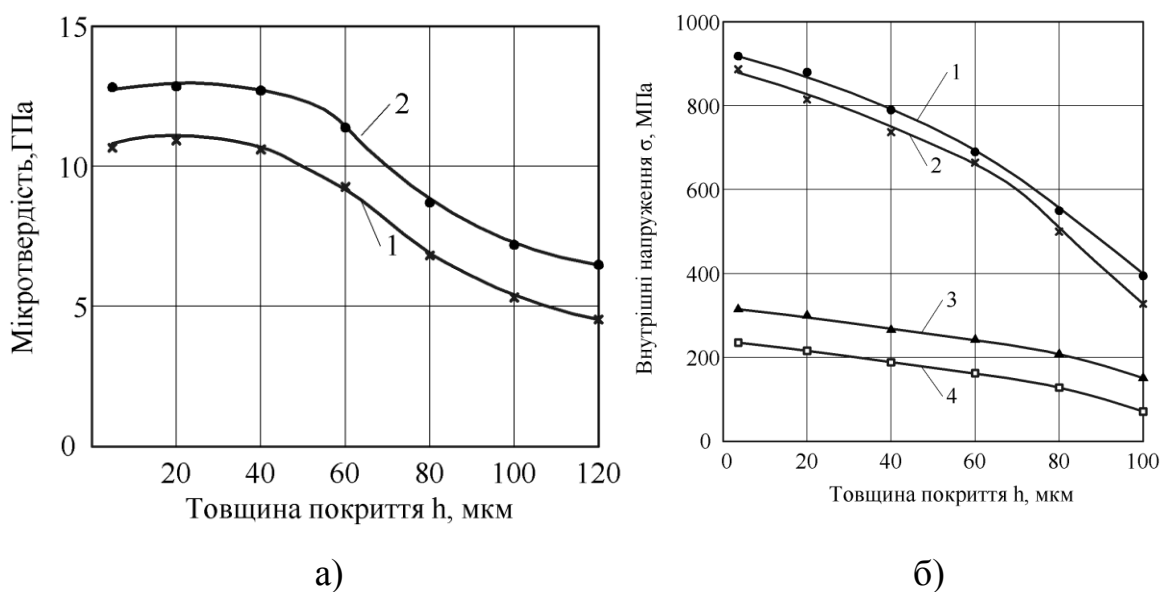


Рис. 4.8. Зміна мікротвердості за товщиною напилених сталевих покриттів після ВЕІЛ в середовищі гранул: 1 – ВК8; 1 –Т15К6 (а) та розподіл внутрішніх напружень за глибиною шарів, отриманих ВЕІЛ в середовищі гранул твердих сплавів ВК8 (1, 3) та Т15К6 (2, 4): 1, 2 – суцільний сталевий зразок; 3, 4 – зразок з напиленим сталевим покриттям (б).

При вивченні внутрішніх напружень σ , які утворюються в шарах сталевих покриттів, легованих твердими сплавами Т15К6 або ВК під час ВЕІЛ,

встановлено, що вони є напруженнями розтягу. На рис. 4.8, б і 4.9 в, б показано зміну внутрішніх напружень від технологічних параметрів ВЕІЛ, таких, як товщина легованого шару h , напруга початку розряду U та ємність конденсаторної батареї C . Встановлено, що внутрішні напруження, які виникають при обробці в гранулах ВК8, більші за величиною, ніж для твердого сплаву Т15К6. При зростанні товщини покриття (рис. 4.8, б) напруження зменшуються, що можна пояснити дією структурних та фазових перетворень в матеріалі шарів, а також дію теплового фактору. Із збільшенням напруги початку розряду (рис. 4.9, а) та ємності конденсаторної батареї (рис. 4.9, б) внутрішні напруження зростають. Це пояснюється тим, що з ростом величини даних технологічних параметрів збільшується енергія іскрового розряду і тим самим збільшується температура покриття, що веде до зростання перепаду температур між новим нанесеним шаром покриття та попередніми шарами і відповідно збільшується величина термічних напружень, що спричиняє до зростання залишкових напружень. Досліджені залежності характерні як для поверхонь сталевих деталей із суцільного матеріалу, оброблених ВЕІ легуванням, так і для деталей з напиленими покриттями, підданими обробці ВЕІЛ. При цьому значення внутрішніх напружень для останніх у всіх випадках, як видно із графіків є меншим, що можна пояснити гетерогенністю структури напилених покриттів та їх пористістю. Ці фактори, на нашу думку, сприяють релаксації напружень, знижуючи їх величину.

Вивчались також залежності зносостійкості композиційних покриттів на основі алюмінію з частинками титану або молібдену. Умови та методику випробувань викладено вище (див. розд. 3). Процеси зношування цих покриттів досліджували на машині тертя СМЦ-2 за схемою диск-колодка виготовлених із сталі 40ХН. Колодка термооброблена до твердості НВ 285–300. На зовнішній циліндричній поверхні диску формувалось покриття складу $Al + 20\% Mo$ та $Al + 20\% Ti$ з товщиною після кінцевої механічної обробки 0,6–0,8 мм. Випробування проводилися з лінійною швидкістю ковзання $V = 0,78$ м/с з питомим тиском 10 МПа в середовищі ємності, заповненої глиняним розчином

із 10 % вмістом частинок кварцового піску розміром 0,1 мм. Час випробовування складав 3 год. Провівши випробовування на зношування покриттів при різній концентрації в алюмінієвій матриці частинок порошків молібдену та титану, встановили, що зростання кількості цих металів в напилених композиційних шарах призводить до збільшення їх зносостійкості і при досягненні концентрації 20 % становить відповідно 3,9 і 4,6 мм³. Пояснюється це наявністю в складі структури покриттів твердих фаз (оксидів, нітридів), які за своїми характеристиками є більш стійкими до зношування, ніж матеріал матриці. При цьому, як відомо, внаслідок її пластичної деформації навантаження буде діяти на більш тверді та менш піддатливі фази, що мають більшу зносостійкість.

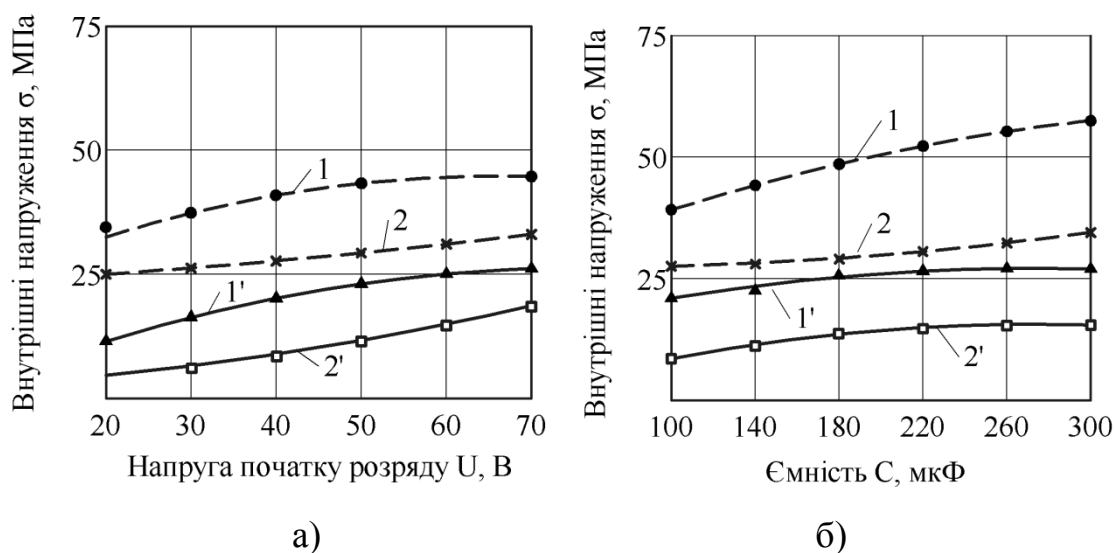


Рис. 4.9. Вплив напруги початку розряду (а) та вплив ємності конденсаторної батареї (б) на величину внутрішніх напружень при ВІЕЛ і середовищі гранулами ВК8 (1, 1') та Т15К6 (2, 2'): 1, 2 – суцільний сталевий зразок; 1', 2' – зразок з напиленим сталевим покриттям.

Досліджували також на тертя та зношування такі напилені покриття, як покриття зі сталі 40Х; композиційне сталь 40Х + 17 % WС з верхнім технологічним шаром; покриття того ж складу без технологічного шару та покриття зі сталі Св08, піддане ВІЕЛ в середовищі гранул твердого сплаву ВК8. Досліди проводили на машині тертя СМЦ-2 за схемою диск-колодка.

Даними випробовуваннями моделювали роботу пари тертя відцентрового насоса: захисна втулка – сальникова набивка [124, 132]. Втулка змонтована на валу насосу і обертається із частотою $n = 2800-3000 \text{ хв}^{-1}$. Сальникова набивка розміщена в корпусі насоса і контактує із зовнішньою циліндричною поверхнею втулки, що обертається разом з валом. В даній випробовувальній схемі диск з напиленим композиційним покриттям моделює втулку, а колодка – відповідно сальник. На робочу поверхню колодки було наклеєно плівку зносостійкого антифрикційного синтетичного матеріалу даклен [19], армованого скловолокнами, який моделював у наших дослідах сальниковий матеріал.

Досліди проводили за швидкості ковзання 7,8 м/с з середнім питомим навантаженням 1 МПа. Диск занурювали на 1/3 зовнішнього діаметра в технічну воду, залиту в спеціальну ємність. Дані експериментів представлено на рис. 4.10. Як бачимо найкращою зносостійкістю володіють покриття, сформовані комплексним методом. Крива зношування 1 для них не має ділянки припрацювання внаслідок високої поверхневої твердості шарів з ВК8. Другим за ефективністю захисту поверхонь деталей від зношування є композиційне покриття сталі 40X + 17 % WC. Крива 2 має ділянку початкового зношування, яка далі переходить у стадію нормального зношування. Він описується лінійною залежністю. Покриття з верхнім технологічним шаром мають двоступеневу ділянку припрацювання (крива 3). Перша ступінь, із більшим кутом нахилу кривої зношування, описує спрацювання технологічного шару покриття, нанесеного на робочу композиційну зону з частинками карбїду вольфраму. Друга ступінь припрацювання із меншим кутом нахилу лінії характеризує припрацювання робочої частини композиційного покриття. Найбільше зношування, спостерігаємо у звичайного напиленого покриття із сталі 40X (крива 4). На практиці такий результат буде означати, що при заданому допустимому зносі поверхні деталі з покриттям найшвидше вийде з експлуатації деталь з покриттям із сталі 40X. Найтривалішим терміном експлуатації володітимуть деталі із захисними шарами, сформованими

комплексним методом шляхом напилення та віброелектроіскрового легування. Відомо, що високі показники покриттів забезпечує комплексний метод [66, 68, 70, 85, 93, 95].

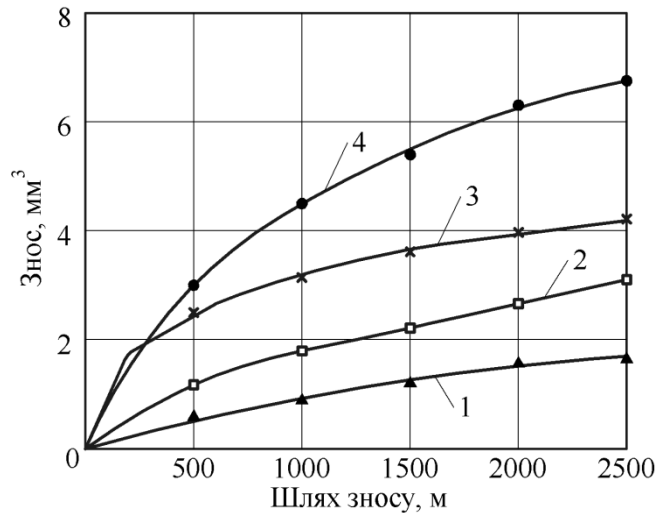


Рис. 4.10. Залежність ступеня зношування зразків з покриттями від шляху тертя:

1 – покриття сталь Св08 після ВЕІЛ в середовищі гранул твердого сплаву ВК8; 2 – напилене композиційне покриття сталь 40X+17% WC; 3 – покриття сталь 40X+17% WC з верхнім технологічним шаром; 4 – покриття із сталі 40X.

За аналогічних умов досліджували зносостійкість композиційних покриттів різного складу, а саме: сталь + 17 % WC, сталь + 17 % TiC, а також звичайного напиленого сталевого покриття. Матрицею покриттів була сталь 40X. Найбільші зносостійкі властивості, виявили у покриттів сталь 40X+17%TiC та сталь 40X + 17 % WC, які в 1,4 та 1,3 рази відповідно перевершують цей показник для звичайного покриття зі сталі 40X. Пояснюється така різниця наявністю в складі композиційних покриттів твердих частинок карбідів TiC і WC, які і сприймають внаслідок пластичності сталеві матриці, основну частку діючого на покриття навантаження.

Подальші дослідження взаємозв'язку технологічних параметрів із властивостями композиційних покриттів були спрямовані на вивчення впливу технологічних режимів електродугового напилення, таких як величина струму

дуги I , напруги U та дистанції напилення L на зносостійкість сформованих композиційних шарів. Досліджувались покриття системи сталь 40X+карбіди TiC або WC. На рис. 4.11 наведено дані, які характеризують залежність зношування вказаних покриттів та звичайного покриття із сталі 40X від величини струму дуги. Як бачимо, найменше спрацювання спостерігається для шарів сталь 40X + TiC при найменшому значенні струму дуги ($I = 150\text{A}$). Це можна пояснити більшою твердістю шарів покриття, яка, як відомо, зменшується з збільшенням потужності дуги, а значить і збільшенням її струму. Також, як було нами досліджено, при збільшенні струму дуги зменшується міцність зчеплення покриття з основою (адгезійна міцність) та напилених частинок між собою (когезійна міцність), що також негативно впливає на зносостійкість покриття.

Вплив іншого технологічного параметру дуги – напруги, аналогічний впливу струму, тобто із збільшенням напруги на дузі зносостійкість напилених в таких умовах покриттів зменшується.

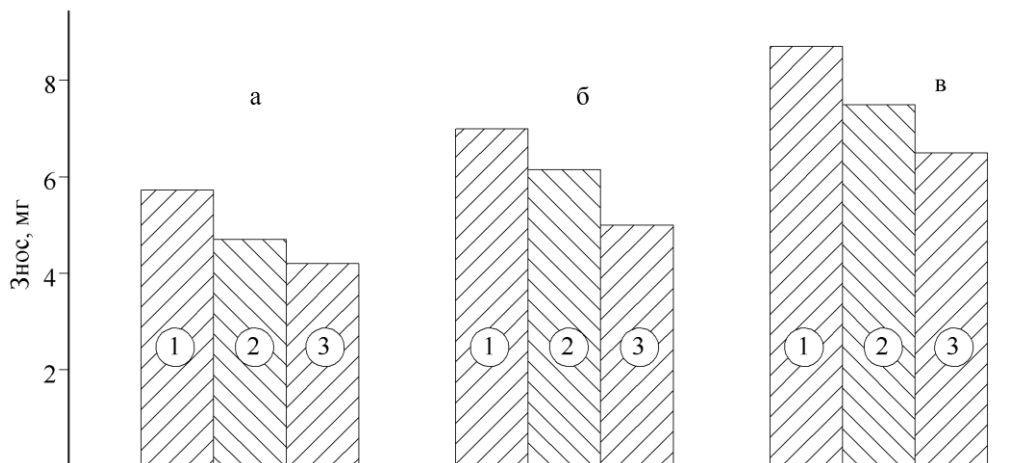


Рис. 4.11. Залежність зносостійкості напилених покриттів, сформованих за різної сили струму на дузі:

а) $I=150\text{ A}$; б) $I=180\text{ A}$; в) $I=210\text{ A}$; 1 – зі сталі; 2 – покриття сталь + 15% WC; 3 – сталь + 15% TiC.

Вивчали також вплив на швидкість зношування композиційних покриттів дистанції напилення. Нами було проведено порівняльні експерименти для

покриттів системи сталь 40X+15% WC, а також для звичайних покриттів із сталі 40X при зміні дистанції напилення в межах 90-150 мм. Кращі результати отримано для покриттів сталь+15% TiC, при цьому всі криві на графіках зношування (рис. 4.12) мають однаковий характер. При малій відстані напилюваної поверхні від зони горіння електричної дуги величина її зношування збільшена, а далі, із ростом довжини дистанції напилення, величина зношування спадає і досягає мінімуму в межах відстаней 100-110 мм. З подальшим зростанням дистанції напилення чисельне значення зношування монотонно збільшується. Такий характер кривих зношування пояснюється тим, що невелика дистанція напилення сприяє більшому нагріванню поверхні теплом дуги, крім того і частинки покриття досягають поверхні більш розігрітими, не встигаючи охолонути на такій короткій дистанції напилення. Це, як вже зазначалось раніше, зменшує твердість поверхневих шарів покриття і тим самим знижує їх зносостійкість. Із ростом дистанції напилення дія вказаних теплових факторів зменшується і зносостійкість зростає досягаючи свого оптимуму при $L=100-110$ мм.

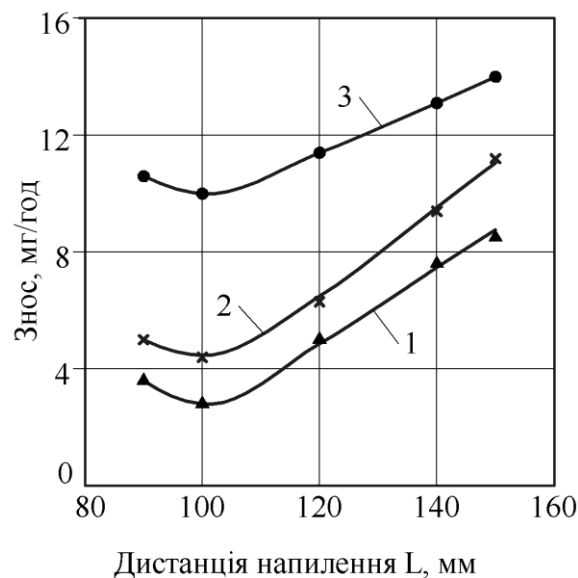


Рис. 4.12. Вплив дистанції напилення на зносостійкість покриттів:

1 – покриття сталь + 15% TiC; 2 – покриття сталь + 15 % WC; 3 – покриття зі сталі.

Подальше збільшення дистанції призводить до зменшення швидкості розпилюваних частинок покриття, а значить і зменшення їх кінетичної енергії, що, в свою чергу, зменшує щільність упакування і міцність напилюваних шарів. Такі структури більше піддаються відлущуванню від поверхні частинок покриття, сприяючи тим самим зменшенню його зносостійкості, що і спостерігається на графіках.

В роботі нами було досліджено ще один із технологічних факторів, який спричиняє певну дію на зносостійкість композиційних покриттів – це підшар з молібдену, який, як вже відмічалось, в силу своїх фізико-хімічних властивостей має досить високу адгезію з основою та з напиленими покриттями.

Нами було проведено експерименти з підготовки поверхні перед нанесенням композиційних покриттів. Для цього віброелектроіскровим легуванням з використанням гранул молібдену формували підшар товщиною 0,03–0,05 мм з подальшим напиленням на нього композиційних покриттів складу сталь – карбід титану або вольфраму.

За результатами проведених дослідів було встановлено, що зносостійкість покриттів, напилених на підшар молібдену, збільшується приблизно в 1,25 рази у порівнянні з тим же покриттям напиленим на основу без підшару. Пояснення такої особливості зношування покриттів, нанесених на підшар, лежить в особливостях неоднорідної структури сформованого віброелектроіскрового молібденового підшару, який характеризується високими пружнопластичними властивостями, що забезпечує демпфування і тим самим сприяє розсіюванню енергії, зменшуючи за рахунок цього швидкість зношування основного робочого шару композиційного покриття.

На рис. 4.13 показано криві зношування напилених композиційних та звичайних покриттів відповідно зі сталі 40X + 17 % WC та тільки зі сталі 40X за різних значень шорсткості Ra. Криві мають висхідний характер: із збільшенням шорсткості поверхні величина зношування її зростає, причому менше для композиту, що пояснюється наявністю в його складі твердих частинок карбіду вольфраму. Оптимальне значення висоти нерівностей для

обох покриттів складає R_a 0,63. Подальше зростання вказаного показника параметра шорсткості викликає збільшення площі механічного контактування і відповідно ріст процесів руйнування вершин нерівностей, що в кінцевому рахунку призводить до зростання величини зношування поверхні покриття.

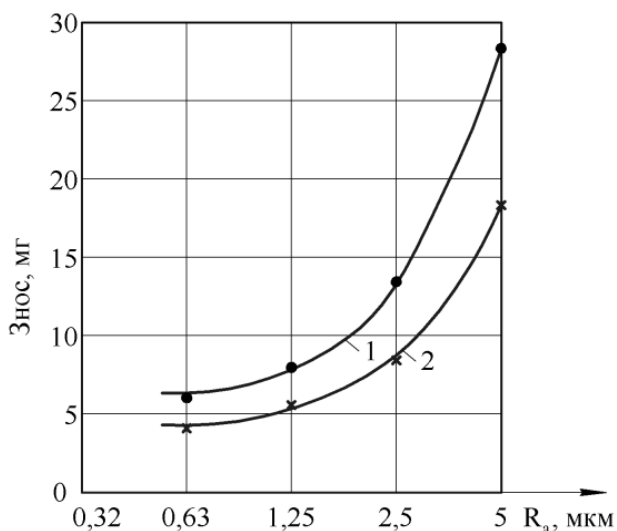


Рис. 4.13. Залежність зношування напиленого покриття від шорсткості поверхні: 1 – покриття зі сталі; 2 – покриття сталь + 17% WC.

Для проведення мікроелектрохімічних вимірювань застосовували мікроелектрод удосконаленої конструкції [13]. Встановлено, що карбідні включення в сталевій матриці покриття працюють як катоди. Різниця потенціалів між окремими шарами композиційного покриття в початковий момент часу в електроліті з високим опором досягає 75 мВ, а в подальшому зменшується. Навантаження зразків згідно рекомендацій [133]. При навантаженні зразків у електроліті за рівень допустимих напружень приймали напруження при яких не відбувався різкий стрибок потенціала у відерну сторону. Величина допустимого рівня напружень при розтягу для зразків зі сталевим покриттям складало біля 240 МПа, а для зразків з композиційним покриттям 210 МПа. Допустиме напруження на кручення становило відповідно 110 МПа і 90 МПа. Дещо нижчі значення цих напружень для композиційних покриттів можна пояснити вмістом в їх складі твердих частинок карбіду вольфраму.

4.2 Вплив технологічних параметрів віброелектроіскрового легування на показники композиційних покриттів, сформованих комплексним методом

Вивчали вплив технологічних параметрів віброелектроіскрового легування [7, 21, 25]: тривалість процесу – τ , хв; напруга початку розряду – U , В; ємність конденсаторної батареї – C , мкФ; частота імпульсів технологічного струму – f , Гц; амплітуда коливань контейнера з гранулами – A , м; частота коливань контейнера – F , Гц на зміну маси ΔG та діаметра ΔD (товщина покриття) зразків після обробки, а також показники, що визначають якість композиційного покриття: шорсткість поверхні, міцність зчеплення з основою.

Дослідження проводили на зразках циліндричної та плоскої форми різних розмірів. Матеріал зразків – сталь 45 ГОСТ 1050-88 або сталь 40Х ГОСТ 4543-71. Матеріал напилюваних покриттів із дротів діаметром 2 мм приймали ідентичним до матеріалу суцільних зразків. Режими електродугового напилення з використанням модернізованого електродугового металізатора: струм дуги $I = 70$ А, швидкість подачі дротів $V = 0,7 - 1$ м/хв., напруга на дузі $U = 26 - 38$ В, тиск розпилюючого повітря $P = 0,5 - 0,55$ МПа. Легуючий матеріал – гранули твердих сплавів Т15К6 і ВК8. Легування поверхонь проводили на модернізованій нами лабораторній установці, яка дозволяє змінювати напругу початку розряду в межах від 12 до 220 В, ємність конденсаторної батареї – від 1 до 320 мкФ. Під час формування композиційних покриттів інші технологічні параметри мали такі значення: частота імпульсів технологічного струму $f = 100$ Гц; амплітуда коливань контейнера $A = 2,2 \cdot 10^{-3}$ м; частота обертання зразка $n = 0,4$ с⁻¹; частота коливань контейнера $F = 25$ Гц.

Встановлено, що віброелектроіскрове легування доцільно проводити за мінімально допустимих частот обертання зразка, які не перевищують 2 с⁻¹, керуючись оптимальними показниками покриттів та іншими технологічними

чинниками. Частота імпульсів, як технологічний фактор, впливає на зміну маси і діаметра зразків у взаємодії з напругою початку розряду і частотою коливання контейнера. Зміна амплітуди коливань суттєво не впливає на контрольовані показники якості покриття. Враховуючи це, а також відносну складність регулювання даного технологічного фактора доцільно проводити обробку виробів за фіксованих значень амплітуди, отримуючи задані властивості композиційного покриття варіюванням інших факторів.

Таким чином, на даному етапі досліджень отримання композиційних покриттів з необхідними показниками здійснювалося нами тільки регулюванням напруги початку розряду U , ємності конденсаторної батареї C джерела технологічного струму та тривалості процесу віброелектроіскрового легування τ .

Характер зміни контрольованих показників покриття – ΔG , ΔD і R_a залежно від виду електродного матеріалу, напруги початку розряду, ємності конденсаторної батареї було досліджено в серії технологічних експериментів.

Вихідна шорсткість циліндричної поверхні суцільних і напилених зразків R_a знаходиться у межах 0,32... 0,63 мкм (ГОСТ 2789-73) перед проведенням ВЕІЛ.

Як показали результати проведених досліджень, найбільш складним є визначення тривалості обробки в іскрових розрядах. Такий висновок підтверджується даними попередніх робіт [103] і пояснюється суттєвою нелінійністю зміни маси зразків, товщини легуваного шару та шорсткості його поверхні від тривалості віброелектроіскрового легування. Характер зміни цих показників дослідних зразків, оброблених в середовищі гранул твердих сплавів Т15К6 та ВК8, графічно зображено на рис. 4.14. Аналіз отриманих кривих показав, що на початку процесу легування відбувається зростання маси, діаметра та шорсткості зразків. У подальшому збільшення тривалості процесу призводить до зменшення маси зразків. Зменшуються також показники ΔD і R_a , однак після деякого часу вони стабілізуються.

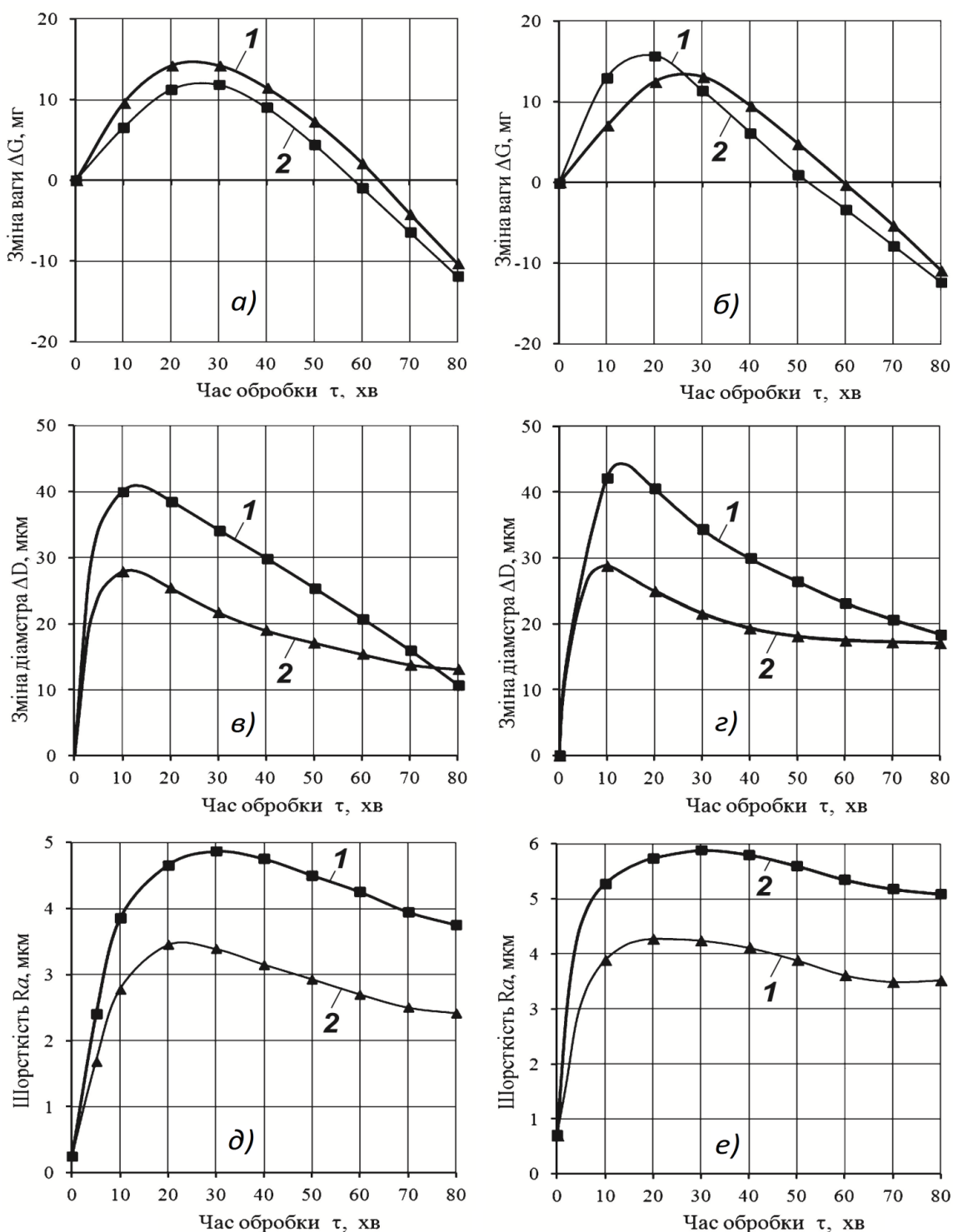


Рис. 4.14. – Залежність зміни маси зразка (а, б), діаметра зразка (в, г), шорсткості поверхні зразка (д, е) від часу ВЕІЛ обробки в середовищі гранул твердого сплаву Т15К6 (а, в, д) і ВК8 (б, г, е):

1 – суцільний сталевий зразок; 2 – зразок із напиленим сталевим покриттям.

Слід також зазначити, що зростання шорсткості та діаметра зразків відбувається більш інтенсивно, ніж масовий їх приріст. Це пояснюється активною участю матеріалу зразків у процесі формування композиційного покриття, оскільки в цей період шорсткість поверхні зразка формується внаслідок як перенесення на неї легуючого матеріалу гранул, так і в результаті ерозійних процесів в основному матеріалі. Зростання маси зразків при одночасному зменшенні їх діаметра та стабілізації шорсткості свідчить про початок руйнування верхівок мікронерівностей, причиною якого є багаторазова механічна і термічна дія гранул та іскрових розрядів між ними та поверхнею покриття, а також заповнення западин нерівностей поверхневого рельєфу їх матеріалом. При подальшому збільшенні часу ВЕІЛ процес зміни діаметра зразків та їх маси, а також шорсткості поверхні знаходиться в стані динамічної рівноваги із домінуванням процесу руйнування поверхневих шарів зразків іскровими розрядами.

Якщо розглянути зміну вказаних параметрів конкретно стосовно матеріалів для легування покриттів, то слід відзначити, що менша інтенсивність деерозії та «динамічна шорсткість» віброелектроіскрової обробки гранулами Т15К6 пояснюється меншою ерозійною стійкістю карбіду титану в порівнянні з карбідом вольфраму. Суттєвий вплив на характеристики сформованого покриття має показник крихкості. Для карбіду титана він в 3,2 рази більший, ніж для карбіду вольфраму, тому більш легко, відділяючись від гранул, частинки твердого сплаву Т15К6 компенсують зменшення маси зразків внаслідок руйнування, і загальна інтенсивність руйнування зменшується; виступи мікронерівностей крихко руйнуються внаслідок силового контакту з гранулами.

Характер зміни поверхні напиленого покриття після легування показано на рис. 4.15.

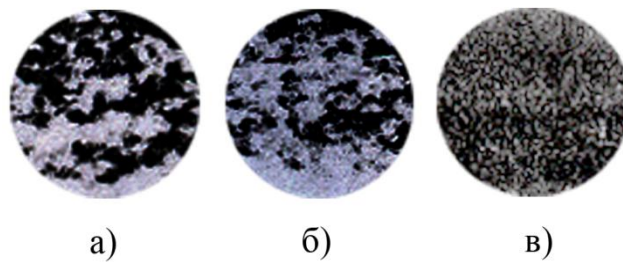


Рис. 4.15. Вигляд поверхні напиленого покриття після віброелектроіскрового легування за різної тривалості процесу:

а – 8 хв; б – 16 хв; в – 24 хв.

Із рисунка видно, що зі збільшенням тривалості легування покриття в середовищі гранул твердого сплаву Т15К6 площа обробленої поверхні зростає. Оптимальний час легування становить 24 хв.

Встановлено, що збільшення напруги накопичувальної ємності батареї призводить до зростання енергії розряду і, відповідно, до збільшення маси ΔG і діаметра зразка ΔD , а також шорсткості R_a поверхні покриття при обробці в середовищі гранул твердого сплаву Т15К6 (рис. 4.16, а). Збільшення напруги початку розряду з 35 В до 60 В призводить: до збільшення маси зразків, (із суцільного матеріалу з $0,17 \times 10^{-6}$ кг до $0,30 \times 10^{-6}$ кг; з напиленим покриттям з $0,15 \times 10^{-6}$ до $0,34 \times 10^{-6}$); збільшує діаметр зразків, (зокрема з суцільного матеріалу з $0,24 \times 10^{-6}$ м до $0,46 \times 10^{-6}$ м; з напиленим покриттям з $0,25 \times 10^{-6}$ м до $0,31 \times 10^{-6}$ м); змінює шорсткість зразків (з суцільного матеріалу R_a від 2,5 мкм до 4,6 мкм; з напиленим покриттям R_a від 2,4 мкм до 4,0 мкм відповідно).

При віброелектроіскровому легуванні гранулами твердого сплаву ВК8 характер зміни діаметра і шорсткості зразка було отримано аналогічний, як і при застосуванні Т15К6, а зміна маси зразка при зміні напруги знаходиться в межах похибки експерименту (рис. 4.16, б). Збільшення напруги початку розряду з 35 В до 60 В збільшує масу зразків, (з суцільного матеріалу з $0,44 \times 10^{-6}$ кг до $0,51 \times 10^{-6}$ кг; з напиленим покриттям не змінюється); збільшує діаметр зразків, (з суцільного матеріалу від $0,26 \times 10^{-6}$ м до $0,39 \times 10^{-6}$ м; з напиленим покриттям – з $0,27 \times 10^{-6}$ м до $0,61 \times 10^{-6}$ м); змінює шорсткість (з суцільного

матеріалу R_a – від 3,2 мкм до 5,4 мкм; з напиленим покриттям R_a – від 3,3 мкм до 6,3 мкм). Ймовірна причина цього полягає в більшій ерозійній стійкості карбїду вольфраму у порівнянні з карбїдом титану. Свій внесок у збільшення маси зразків при ВЕІЛ сплавом Т15К6 робить така властивість карбїду титану TiC , як крихкість.

Якщо порівнювати досліджувані характеристики зразків із компактного матеріалу та з напиленим покриттям, то слід відзначити подібний характер їх зміни. Однак їх числові значення для напилених покриттів будуть меншими, що можна пояснити наявністю у складі покриттів достатньо великої кількості оксидів, підвищеною твердістю, шаруватістю, пористою структурою відповідно. Всі ці фактори призводять до зниження рівня вказаних показників – ΔG , ΔD , R_a .

Тенденція до зміни маси, діаметра зразків та шорсткості при збільшенні ємності конденсаторної батареї аналогічна зміні цих показників при зростанні напруги початку розряду (рис. 4.17). Отже, регулюючи ці технологічні параметри, можна керувати величиною енергії розряду конденсатора W_p :

$$W_p = CU^\beta,$$

де W_p – енергія розряду конденсатора; C – ємність конденсаторної батареї; U – напруга заряду конденсаторної батареї; β – показник степеня.

Зміна ємності конденсаторної батареї від 80 мкФ до 180 мкФ при ВЕІЛ Т15К6 призводить до зміни маси зразків (для суцільного матеріалу – з $0,18 \times 10^{-6}$ кг до $0,40 \times 10^{-6}$ кг; з напиленим покриттям – з $0,20 \times 10^{-6}$ кг до $0,48 \times 10^{-6}$ кг); зміни діаметра зразків (з суцільного матеріалу з $0,28 \times 10^{-6}$ м до $0,47 \times 10^{-6}$ м; з напиленим покриттям з $0,26 \times 10^{-6}$ м до $0,32 \times 10^{-6}$ м); змінює шорсткість (з суцільного матеріалу R_a – від 3,0 мкм до 4,2 мкм; з напиленим покриттям R_a – від 2,7 мкм до 3,6 мкм відповідно). Зміна ємності конденсаторної батареї від 80 мкФ до 180 мкФ при ВЕІЛ ВК8 призводить до зміни маси зразків: для суцільного матеріалу практично незмінна; з напиленим покриттям – з $0,44 \times 10^{-6}$ кг до $0,47 \times 10^{-6}$ кг; до зміни діаметра зразків, зокрема з суцільного матеріалу – з

$0,32 \times 10^{-6}$ м до $0,58 \times 10^{-6}$ м, з напиленням покриттям – з $0,26 \times 10^{-6}$ м до $0,40 \times 10^{-6}$ м; до зміни шорсткості з суцільного матеріалу – від 2,8 мкм до 5,0 мкм, з напиленням покриттям – від 2,3 мкм до 4,5 мкм відповідно. Характерно, що зі зміною напруги в 1,5 рази і ємності в 2 рази маса зразків, оброблених гранулами Т15К6, змінюється приблизно в 2 рази, що свідчить про значення показника степені $\beta > 1$, а також підтверджує вплив енергії іскрових розрядів на величину ерозії електродних матеріалів. Приблизна рівність величин відносної зміни ΔD і R_a як при легуванні Т15К6, так і ВК8 підтверджує значний внесок матеріалу основи зразка у формування мікронерівностей поверхневого шару внаслідок його ерозії.

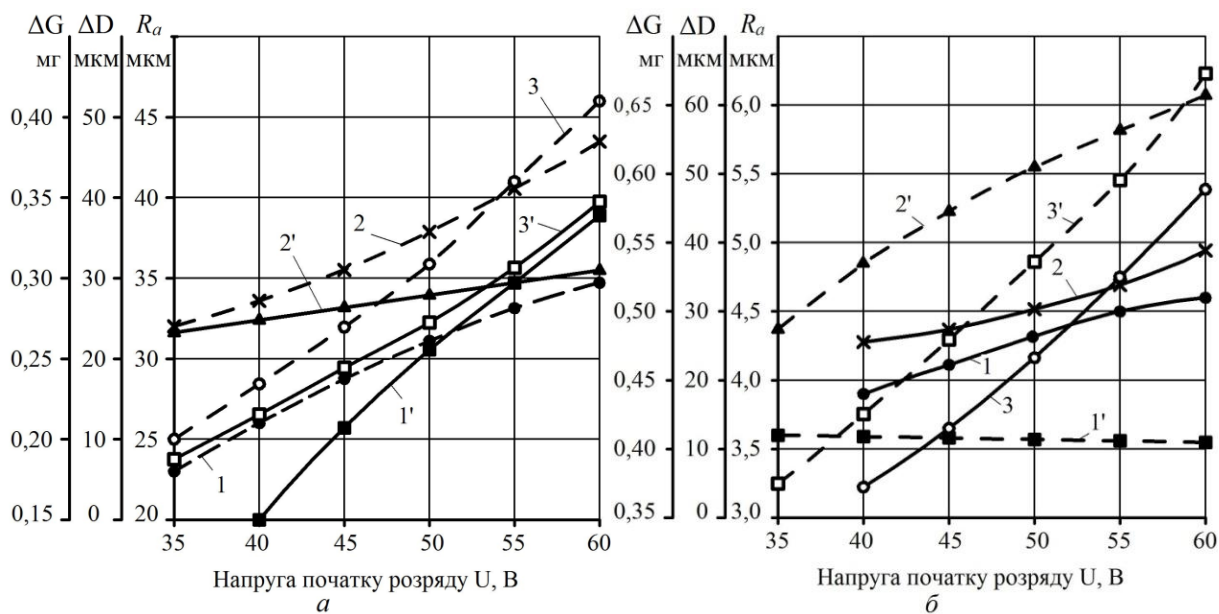


Рис. 4.16. Зміна маси ΔG (1, 1'), діаметра ΔD (2, 2') та шорсткості R_a (3, 3') залежно від величини напруги початку розряду при ВЕІЛ в середовищі гранул твердого сплаву Т15К6 (а) і ВК8 (б):

1, 2, 3 – суцільний матеріал зразка; 1', 2', 3' – зразок з напиленням покриттям

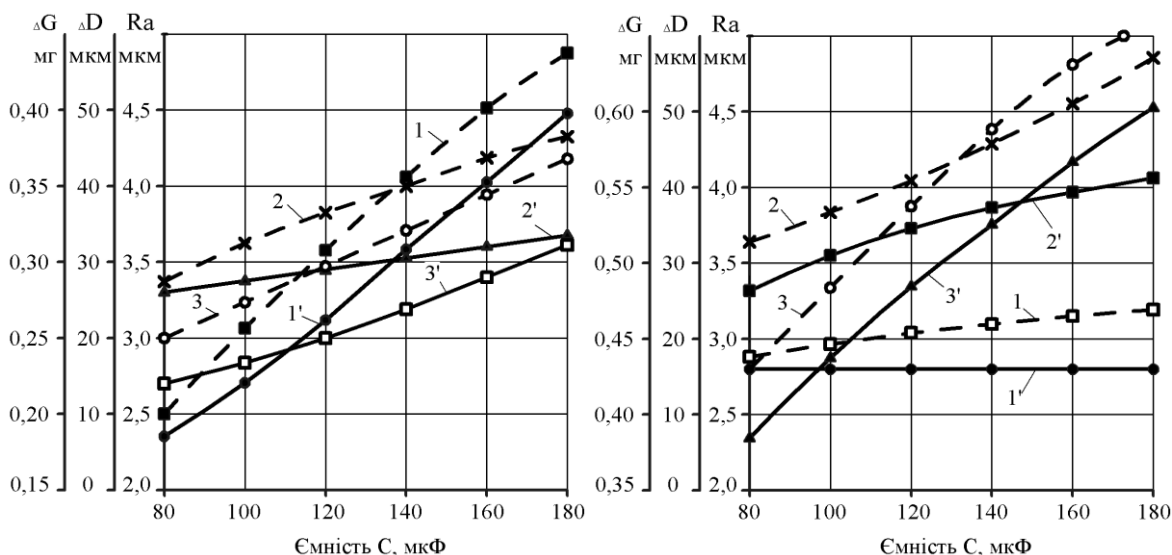


Рис. 4.17. Зміна маси ΔG (1, 1'), діаметра ΔD (2, 2') та шорсткості R_a (3, 3') залежно від величини ємності конденсаторної батареї при ВЕІЛ в середовищі гранул твердого сплаву Т15К6 (а) і ВК8 (б):

1, 2, 3 – суцільний матеріал зразка; 1', 2', 3' – зразок з напиленням покриттям

Аналізуючи отримані графічні залежності (рис. 4.14–4.17) слід також відзначити, що зміна розмірів і шорсткості вільних поверхонь, оброблених ВЕІЛ, в багатьох випадках відповідає технічним вимогам до стану та точності поверхонь деталей, і не потрібно проводити їх подальшу механічну обробку. У випадку використання віброелектроіскрового легування для забезпечення точних посадкових розмірів деталі виникає необхідність у проведенні механічної обробки легованої поверхні різанням, а отримані вище експериментальні дані мають важливе значення для аналітичного розрахунку припусків.

За результатами виконаних досліджень було оптимізовано технологічні параметри ВЕІЛ напилення покриттів. Використовуючи отримані дані, ми провели також досліди, за результатами яких визначено залежність міцності зчеплення композиційних шарів з основою (на відривання), за відомою методикою, від тривалості процесу обробки їх іскровими розрядами. Було встановлено, що числові значення вказаної величини, одержані обробкою в середовищах гранул твердих сплавів Т15К6 і ВК8, близькі за величиною для

обох шарів (рис. 4.18). При цьому характерне зменшення міцності зчеплення зі збільшенням тривалості іскрового легування як для напиленого, так і суцільного матеріалу основи. Таку залежність можна пояснити зростанням внутрішніх напружень у міру збільшення тривалості часу процесу обробки. Даний фактор призводить до виникнення мікротріщин та послаблення перерізу сформованого шару покриття.

Бачимо, що ВЕІЛ впливає на збільшення величини, міцності зчеплення шару покриття з основою, величини якої суттєво перевищують аналогічні показники, отримані для покриттів нанесених методом електродугового напилення (див. п. 4.1).

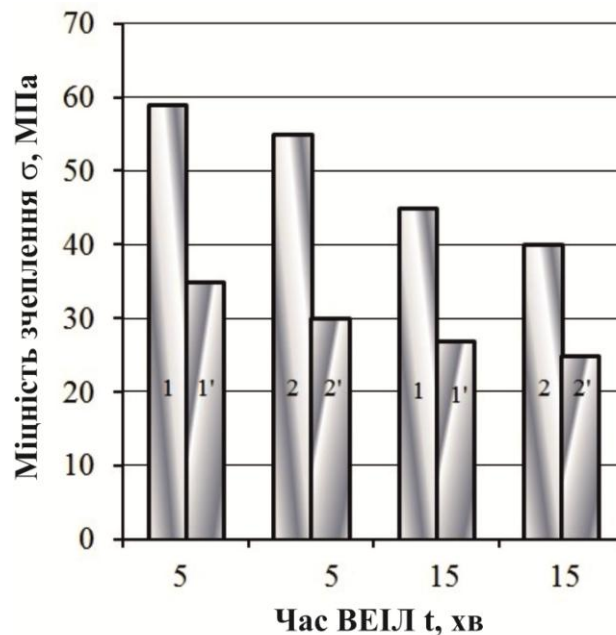


Рис. 4.18 – Міцність зчеплення з основою шарів, отриманих ВЕІЛ обробкою твердими сплавами Т15К6 (1) та ВК8 (2) за різної тривалості процесу легування:

1, 2 – на зразках з компактного матеріалу; 1', 2' – на зразках з напиленого матеріалу.

4.3. Аналіз точності токарної обробки зовнішньої циліндричної поверхні втулок з покриттям

Досліджено точність обробки зовнішньої циліндричної поверхні втулок із суцільного матеріалу та з напиленим покриттям [9, 28]. Для проведення аналізу точності токарної обробки обрано розрахунково-аналітичний метод, розроблений проф. Бородачевим А. Н. і вдосконалений в подальшому в роботах проф. Соколовського В. В. і проф. Балакшина Н. В. та їх учнів і послідовників. Метод ґрунтується на використанні аналітичних залежностей, кількісних зв'язків між складовими похибки обробки і факторами, що їх викликають та на варіантному вирішенні рівняння балансу точності технологічної операції [69]. Він містить:

- визначення розрахунком або за нормативами первісних похибок і їх вплив на точність розмірів та інші точнісні характеристики деталі;
- сумування первісних похибок з метою встановлення загальної похибки обробки механічної операції;
- побудову діаграми точності та гістограми (таблиці) похибок обробки;
- встановлення на підставі аналізу результатів розрахунків можливості запобігання або зменшення первісних похибок.

Розглянемо можливість застосування розрахунково-аналітичного методу аналізу точності на конкретному прикладі. Визначаємо похибки при чистовому точінні на заздалегідь налагодженому методом пробних деталей токарному верстаті з ЧПК моделі 16К20Ф3. Обробляли партію зразків у вигляді втулок із зовнішнім діаметром $d = 74$ мм і довжиною обробки $L = 100$ мм з напиленим електродуговим методом покриттям із сталі 45 на розробленій нами установці [10, 14], а також із суцільної сталі тієї ж марки. Деталі закріплювали на цанговій оправці по внутрішньому отвору. Інструмент – різець прохідний з пластиною з твердого сплаву Т15К6.

Режими токарної обробки втулок визначали за відомими рекомендаціями [134, 135] і складали для зразків втулок з суцільного матеріалу: швидкість різання $V = 120$ м/хв, поздовжня подача $S = 0,15$ мм/об, глибина різання $t_{max} = 0,5$ мм, $t_{min} = 0,4$ мм; для зразків втулок з напиленим покриттям відповідно: $V = 22$ м/хв, $S = 0,25$ мм/об, $t_{max} = 0,5$ мм, $t_{min} = 0,4$ мм.

Схема обробки втулок представлена на рис. 4.19.

Прийнятий метод досягнення заданої точності супроводжується похибками обробки, що викликано причинами випадкового та систематичного характеру. При цьому і похибки, що виникають під час обробки, будуть випадковими або систематичними. До випадкових похибок належать похибка настроювання Δ_n , похибка від зміни величини деформації Δ_y системи «верстат – пристрій – інструмент – деталь» (ВПД) внаслідок зміни сил різання, спричинених зміною фізико-механічних властивостей поверхневих шарів (наприклад, твердості) та коливання глибини різання від t_{max} до t_{min} . До випадкових похибок належить також похибки розсіювання розмірів, пов'язані з видом обробки – миттєве розсіювання $\Delta_{м.н.}$ та похибки установки деталей в пристрої ε .

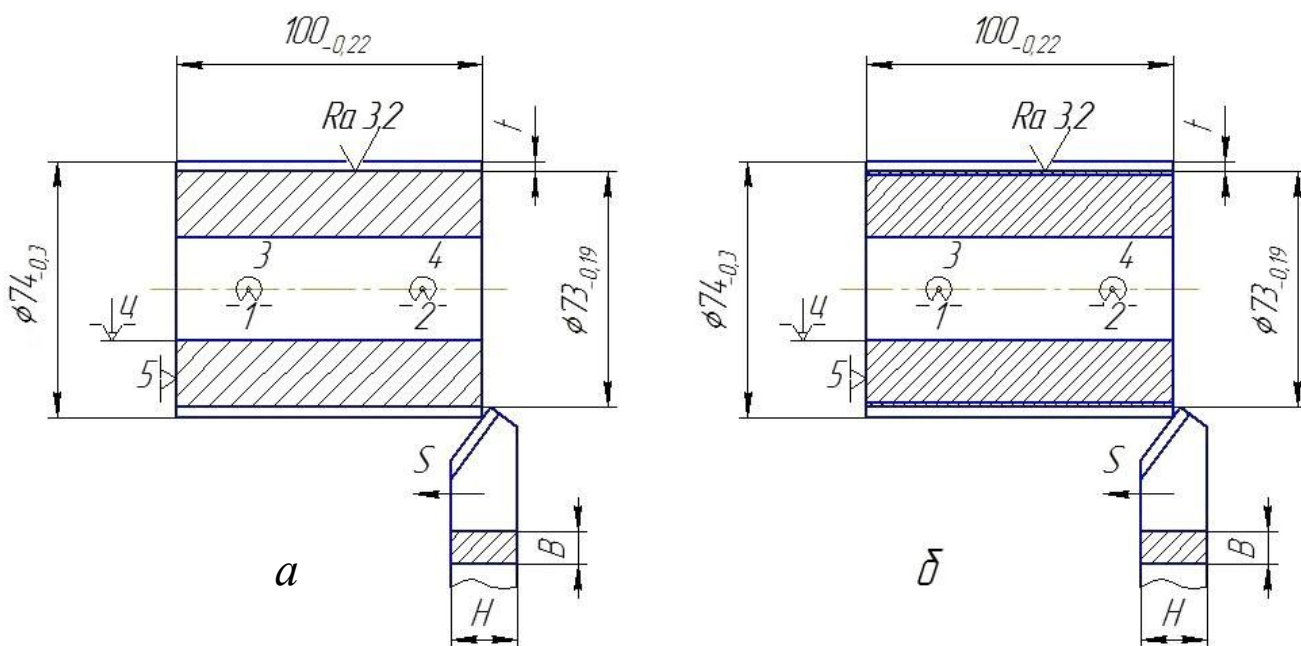


Рис. 4.19. Схема обробки втулок при точінні:

а) зразок із суцільного матеріалу; б) зразок із напиленим покриттям.

Систематичні похибки виникають внаслідок геометричної неточності верстата, розмірного спрацювання різального інструмента Δi та його температурних деформацій ΔT .

Сума систематичних та випадкових похибок утворює загальну похибку $\Delta_{\text{сум.}}$, яка визначається наступною відомою залежністю:

$$\Delta_{\text{сум}} = 1,2\sqrt{\Delta_{\text{м.н.}}^2 + \varepsilon^2} + \Delta_{\text{сист}}, \quad (4.1)$$

де $\Delta_{\text{м.н.}}$ – похибка миттєвого розсіювання розмірів оброблюваної поверхні, мм;

ε – похибка установки, мм;

$\Delta_{\text{сист}}$ – систематична похибка, яка є алгебраїчною сумою систематичних похибок, що виникають під час обробки деталі, мм.

Розрахунок похибок наведений в додатку Г.

За результатами розрахунку будуюмо теоретичні діаграми точності токарної обробки (рис. 4.20), які наочно ілюструють зміну розміру деталі в часі під дією чинників обробки.

Аналізуючи побудовані діаграми точності (рис. 4.20), відзначимо таку особливість: співвідношення між економічною стійкістю T_e і технологічною стійкістю T_T буде таким: $T_e < T_T$, що означає необхідність перезаточування різця. Відмінність побудованих діаграм полягає в тому, що за рахунок більш високих значень режимів різання графік для зразків з суцільного матеріалу є більш «крутим», ніж для напилених зразків. Це означає, що технологічна стійкість різця при обробці буде більшою для зразків з напиленням покриттям та більш інтенсивною в часі втрата точності обробки для суцільних зразків.

Загальна похибка обробки $\Delta_{\text{сум}}$ при $T_e = 60$ хв. становить

$$\Delta_{\text{сум}} = \Delta_{\text{м.н.}} + \Delta_{\text{сист}}, \quad (4.2)$$

– для суцільних зразків:

$$\Delta_{\text{сум}} = 0,065 + 0,070 = 0,135 \text{ мм},$$

– для зразків з покриттям:

$$\Delta_{\text{сум}} = 0,065 + 0,017 = 0,082 \text{ мм.}$$

Визначимо настроювальний розмір

$$d_{\text{настр}} = d_{\text{min}} + \frac{\Delta_{\text{м.н.}}}{2} + C. \quad (4.3)$$

Величина C дорівнює $\Delta_{\text{суст.}}$ при $\tau=0$ мінус $\Delta_{\text{суст. min}}$:

– для зразків з суцільного матеріалу:

$$C = 12 - (-3) = 15 \text{ мкм} = 0,015 \text{ мм};$$

– для зразків з покриттям:

$$C = 18 - (-8) = 26 \text{ мкм} = 0,026 \text{ мм.}$$

Таким чином:

– для зразків з суцільного матеріалу:

$$d_{\text{настр}} = 72,81 + 0,0325 + 0,015 = 72,8575 \text{ мм};$$

– для зразків з напиленням покриттям:

$$d_{\text{настр}} = 72,81 + 0,0325 + 0,026 = 72,869 \text{ мм.}$$

Оцінимо питомий внесок C_j кожної з первинних похибок в загальну похибку обробки, визначену при $T_e = 60$ хв, тобто в сумарну похибку $\Delta_{\text{сум}}$, за виразом

$$C_j = \frac{\Delta_j}{\Delta_{\text{сум}}} \cdot 100\%, \quad (4.4)$$

де Δ_j – величина j -ої похибки.

Результати питомого внеску первинних похибок у загальну похибку токарної обробки зведено в табл. 4.3.

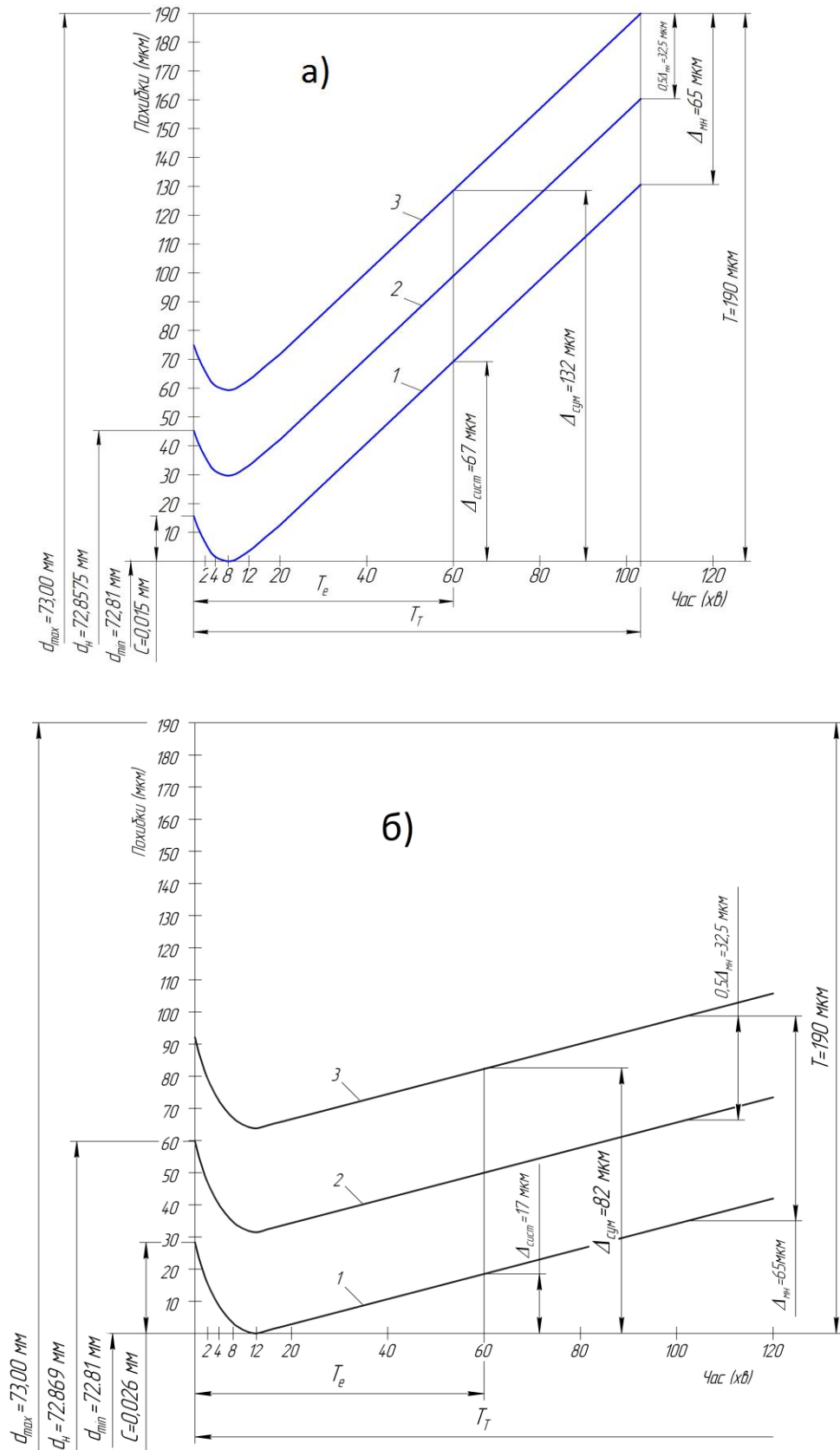


Рис. 4.20. Теоретична діаграма точності токарної обробки зразків з суцільного матеріалу (а) та з напиленим покриттям (б):

1, 2, 3 – нижня, середня та верхня лінії розсіювання розмірів відповідно.

Таблиця 4.3

Питомий внесок первинних похибок в загальну похибку обробки зразків

| Похибка Δ_j | Δ_σ | Δ_H | Δ_y | $\Delta_{м.н.}$ | Δ_i | Δ_T | $\Delta_{сист}$ |
|-------------------------------|-------------------------------|------------|------------|-----------------|------------|------------|-----------------|
| | Втулка з суцільного матеріалу | | | | | | |
| Числове значення похибки, мкм | 24 | 34 | 2 | 65 | 98 | 31 | 70 |
| $c_j, \%$ | 17,8 | 25 | 1,5 | 48,1 | 72,6 | 23 | 51,9 |
| | Втулка з покриттям | | | | | | |
| Числове значення похибки, мкм | 24 | 34 | 1 | 65 | 42 | 33 | 17 |
| $c_j, \%$ | 29,3 | 41,5 | 1,2 | 79,3 | 51,2 | 40,2 | 20,7 |

За даними таблиці 4.3 встановили, що домінуючими похибками обробки є похибки від миттєвого розсіювання, від розмірного спрацювання та теплових деформацій різця. Зменшення впливу миттєвого розсіювання досягають застосуванням більш точного мірного інструменту і обладнання. Останній варіант вимагає досить зваженого підходу, оскільки його реалізація може призвести до суттєвого зниження економічних показників виробництва. Якщо похибки від теплових деформацій зразків приблизно рівні, то розмірне спрацювання інструмента при точінні зразків із сталі значно переважає цей показник для зразків з покриттям. Це пояснюється більшою міцністю суцільної сталі в порівнянні із напиленим покриттям. Для зменшення впливу вказаних факторів на точність токарної обробки слід застосовувати охолодження інструменту, а також збільшити його стійкість.

4.4. Дослідження шорсткості поверхні композиційних покриттів після механічної обробки для забезпечення формування покриттів комплексним методом

Роботоздатність деталей машин залежить від стану їх поверхневих шарів [142, 143], а також від напруженого стану в покриттях [144]. Для визначення закономірностей зміни шорсткості оброблених поверхонь по глибині технологічного шару двошарового композиційного покриття, нанесеного електродуговим методом, та встановлення величини оптимальної глибини його обробки різанням (припуску), на якій забезпечується отримання оптимального (мінімального) значення шорсткості обробленої поверхні виконували дослідження на сталевих (сталь 45) зразках циліндричної форми, на поверхню яких наносили покриття із сталі 45 різної товщини h , а саме: 0,6; 1,2; 1,8; 2,4 мм. Для напилення покриттів застосовували розроблену нами установку [10, 14], яка дозволяє наносити покриття електродуговим методом як із суцільних дротів, так і з використанням суцільних дротів та порошкових матеріалів, які вводять в металоповітряний потік із живильника. Дослідження проводили на одношарових покриттях, напилених із матеріалу суцільних дротів (сталь), та на двошарових композиційних покриттях, що складаються з нижнього робочого композиційного шару (суміші частинок основного матеріалу сталевих дротів і частинок порошку карбиду вольфраму), та верхнього технологічного шару, напиленого тільки із матеріалу дротів.

Осьові перерізи циліндричних деталей із нанесеними одношаровим напиленням та комбінованим двошаровим композиційним покриттями представлені на рис. 4.21.

Після завершення процесу напилення зразків проводили пошарову, із заданим кроком, механічну обробку на токарно-гвинторізному верстаті.

Види стружок, які утворюються в процесі точіння зразків із суцільної та напиленої сталі, зображені на рис. 4.22.

Із фотографій видно, що в процесі механічної обробки суцільного зразка зі сталі утворюється стружка у вигляді кілець та дрібного в'юна (рис. 4.22, а), а в процесі точіння напиленого сталевго покриття – у вигляді дрібної крихти, шматочків та висічки (рис. 4.22, б). Така відмінність стружок зумовлена специфікою будови напиленого покриття: ламелеподібністю, шаруватістю і пористістю.

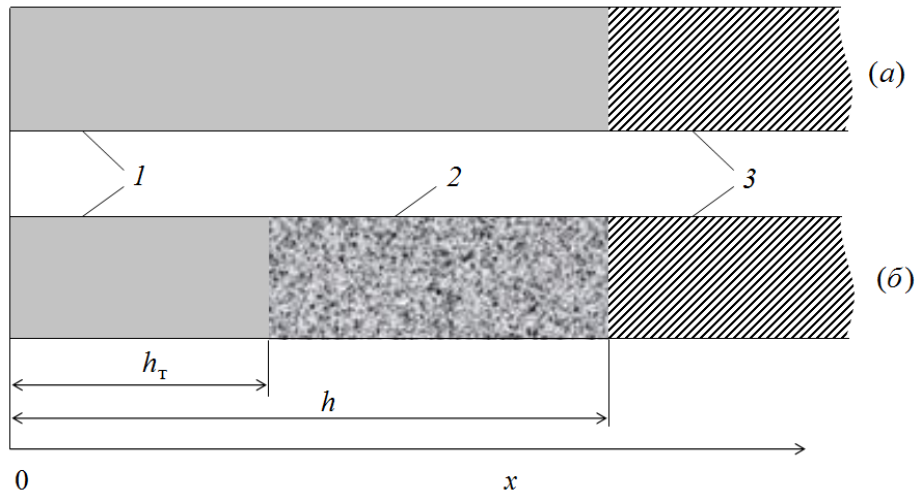


Рис. 4.21 Схема одношарового напиленого покриття (а) та двошарового композиційного покриття (б):

1 – шар напиленого покриття; 2 – шар напиленого композиційного покриття; 3 – основа.

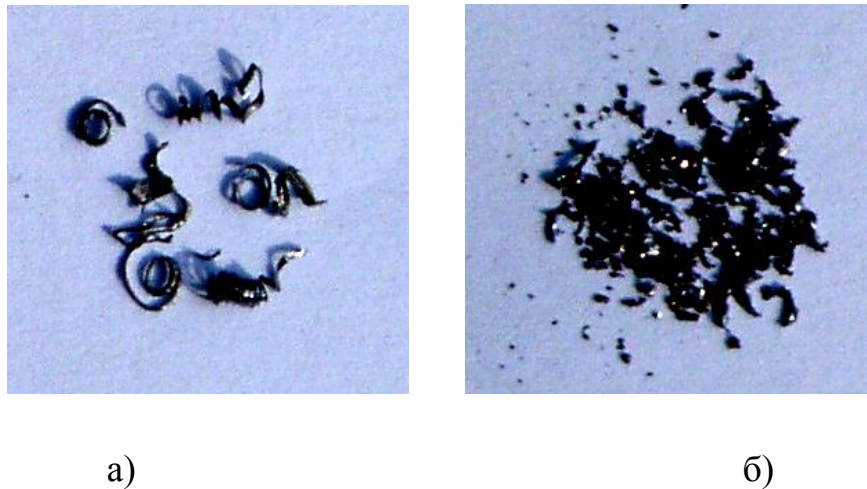


Рис. 4.22. Загальний вигляд стружки при точінні циліндричних зразків із суцільної сталі (а) та з напиленим сталевим покриттям (б).

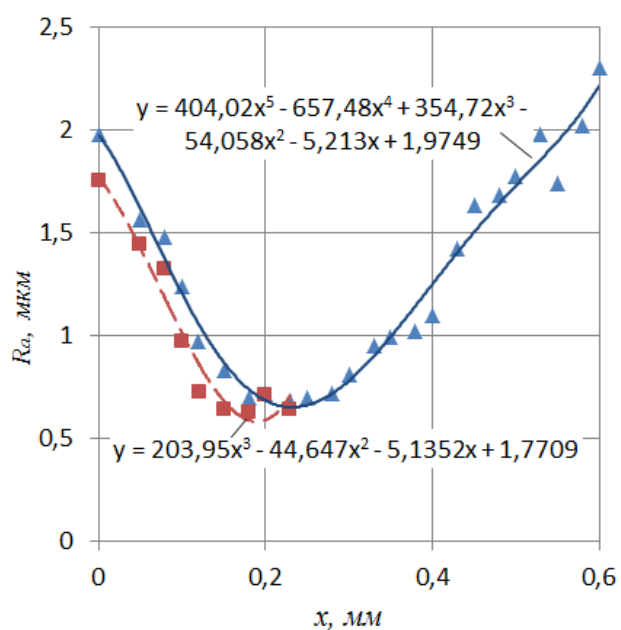
Величину шорсткості R_a оброблених поверхонь зразків з покриттями вимірювали на профілографі-профілометрі. Сканування здійснювали вздовж твірної циліндричних зразків.

Для досягнення поставленої мети побудуємо математичні моделі, що аналітично описуватимуть залежності величини шорсткості від глибини зрізаного шару покриття та дозволять визначити найбільш ймовірні оптимальні значення параметрів, а також визначимо залежність оптимальних значень шорсткості по глибині для напилених покриттів різної товщини при їх пошаровій механічній обробці.

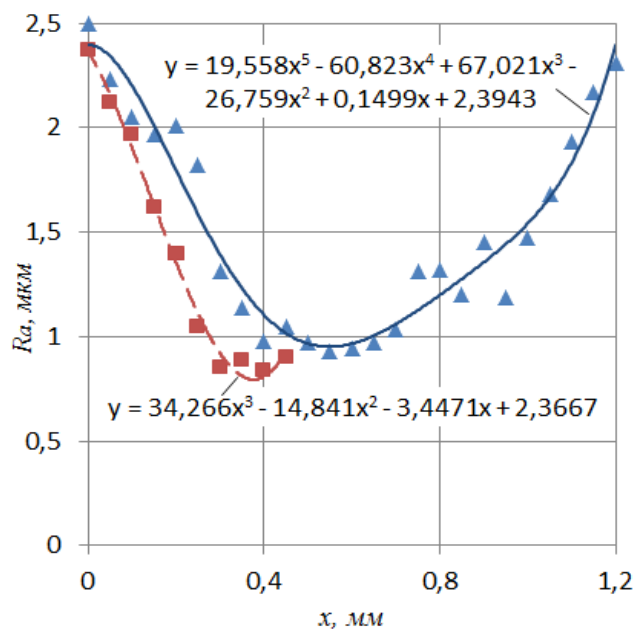
Результати вимірювань представлені на графіках (рис. 4.23). Марковані точки відображають експериментальні значення параметра шорсткості R_a відповідно до величини знятого припуску різанням при пошаровій механічній обробці зразків для кожної із вказаних вище товщин покриттів.

Максимальне значення по осі абсцис відповідає товщині нанесеного покриття h у кожному з розглядуваних випадків. Як видно з рисунків, основна тенденція зміни параметра шорсткості поверхні у залежності від глибини зрізаного шару практично однакова для всіх досліджуваних товщин обох типів напилених покриттів, і за виглядом ці криві відрізняються практично у межах статистичної похибки. Крім того, криві з квадратними маркерами, що відповідають напиленим композиційним покриттям, лежать дещо нижче від кривих, маркованих трикутниками (напилені покриття). Тобто для усіх зрізів однакової товщини оброблені поверхні напилених композиційних покриттів будуть мати меншу шорсткість порівняно з звичайними напиленими покриттями.

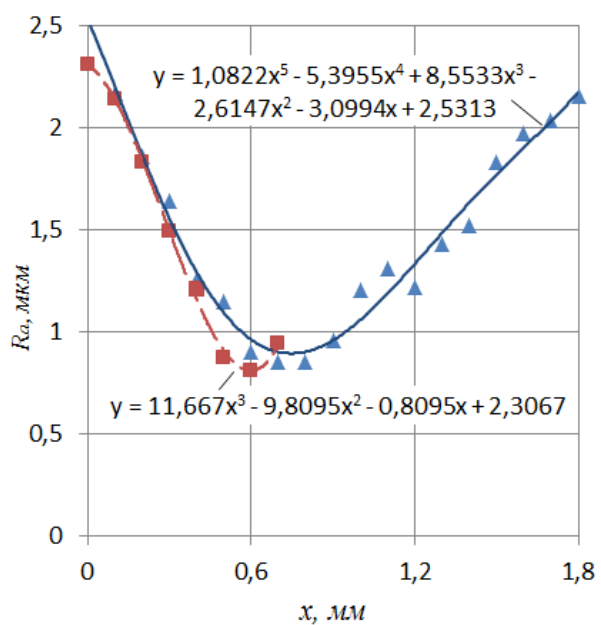
Основні результати досліджень для покриттів різної товщини наведено у таблиці 4.4.



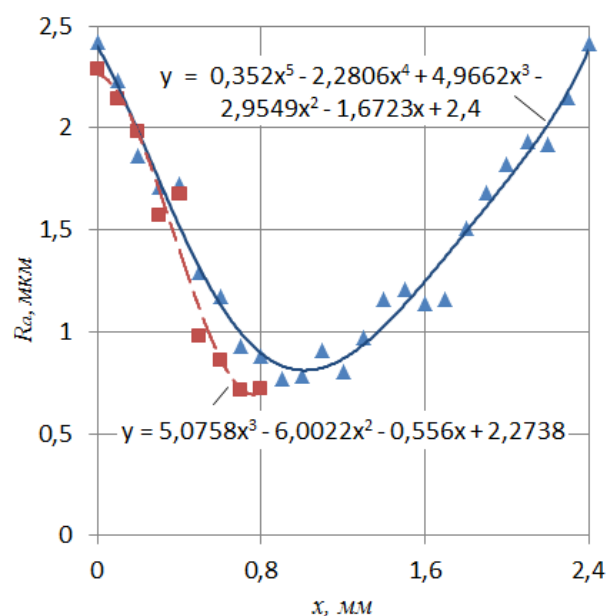
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.23. Залежність шорсткості поверхні від глибини зрізаного шару для покриттів різної товщини (трикутні маркери – одношарове покриття; квадратні – двошарове композиційне покриття):

а) $h = 0,6$ мм; б) $h = 1,2$ мм; в) $h = 1,8$ мм; г) $h = 2,4$ мм.

Статистичні оцінки залежностей параметра шорсткості поверхні від глибини
обробки

| h , мм | Рівняння регресії для розрахунку шорсткості | R^2 | $\sigma_{зал}^2$ | Значущість рівняння при рівні надійності 95 % |
|--|--|-------|------------------|---|
| Двошарових напилених композиційних покриттів | | | | |
| 0,6 | $y = 203,95x^3 - 44,647x^2 - 5,1352x + 1,7709$ | 0,972 | 0,063 | Статистично значуще |
| 1,2 | $y = 34,266x^3 - 14,841x^2 - 3,4471x + 2,3667$ | 0,991 | 0,025 | Статистично значиме |
| 1,8 | $y = 11,667x^3 - 9,8095x^2 - 0,8095x + 2,3067$ | 0,998 | 0,004 | Статистично значуще |
| 2,4 | $y = 5,0758x^3 - 6,0022x^2 - 0,556x + 2,2738$ | 0,957 | 0,112 | Статистично значуще |
| Одношарових напилених покриттів | | | | |
| 0,6 | $y = 404,02x^5 - 657,48x^4 + 354,72x^3 - 54,058x^2 - 5,213x + 1,9749$ | 0,955 | 0,162 | Статистично значуще |
| 1,2 | $y = 19,558x^5 - 60,823x^4 + 67,021x^3 - 26,759x^2 + 0,1499x + 2,3943$ | 0,943 | 0,342 | Статистично значуще |
| 1,8 | $y = 1,0822x^5 - 5,3955x^4 + 8,5533x^3 - 2,6147x^2 - 3,0994x + 2,5313$ | 0,979 | 0,094 | Статистично значуще |
| 2,4 | $y = 0,352x^5 - 2,2806x^4 + 4,9662x^3 - 2,9549x^2 - 1,6723x + 2,4$ | 0,972 | 0,184 | Статистично значуще |

На основі побудованих апроксимаційних залежностей можна встановити розташування обробленої поверхні з мінімальною шорсткістю відносно зовнішньої необробленої поверхні покриття, а також визначити величину припуску x^* (сумарну товщину зрізаних шарів), необхідну для отримання мінімальної шорсткості робочої поверхні. Залежності величин оптимального припуску для напилених покриттів обох типів різної товщини, а також значення мінімальної шорсткості для припусків на обробку цих покриттів відповідної товщини показано на рис. 4.24. У даному випадку чотирьох вузлів апроксимації

(чотирьох товщин покриттів h : 0,6; 1,2; 1,8; 2,4 мм) кубічні поліноми є інтерполяційними кривими ($\varepsilon_i = 0$, $R^2 = 1$). Як видно з рисунка, мінімальна величина шорсткості оброблених поверхонь для напилених композиційних покриттів у порівнянні із напиленими покриттями досягається при знятті меншого припуску на механічну обробку, а залежність $\min(R_a)$ від x для покриттів різної товщини не є монотонною. Досягнення мінімальних шорсткостей поверхонь при знятті менших припусків на обробку напилених композиційних покриттів можна пояснити більшою твердістю робочого композиційного шару порівняно із твердістю верхнього технологічного шару, який отриманий напиленням тільки із суцільних дротів.

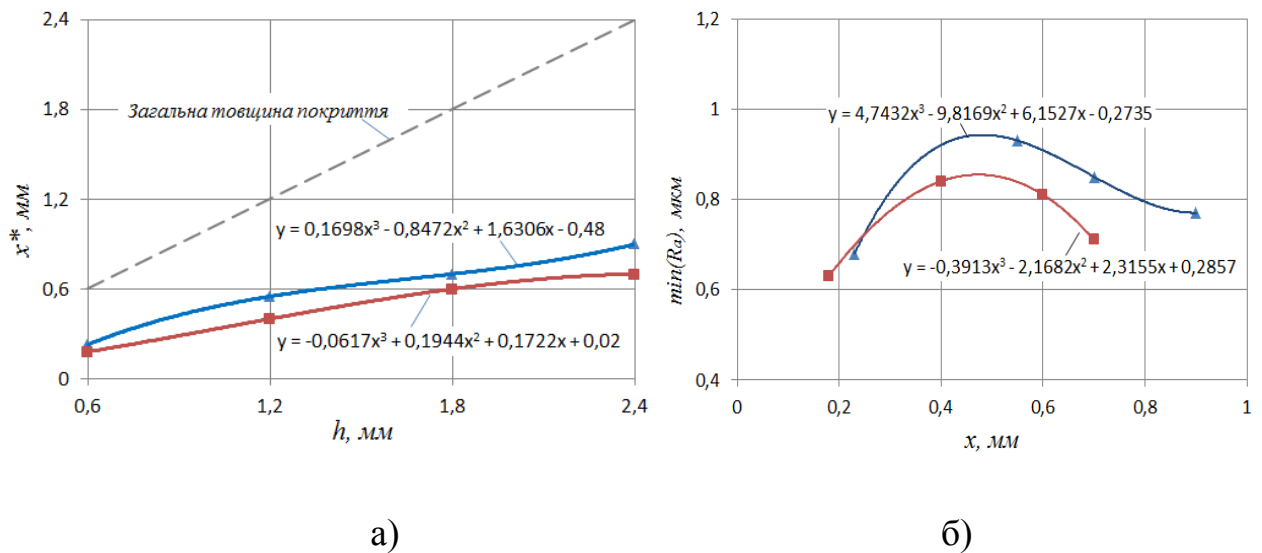


Рис. 4.24. Залежність величини оптимального припуску x^* для покриттів різної товщини (а) та значення мінімальної шорсткості для припусків на обробку покриттів відповідних товщин (б):

трикутні маркери – напилене покриття; квадратні – напилене композиційне покриття.

За призначенням оброблена поверхня з мінімальною шорсткістю та шар покриття, на якому вона формується, може використовуватись як робоча, у випадку, якщо деталь є складовою одиницею пари тертя і не висуваються спеціальні вимоги до її твердості. В іншому випадку цю поверхню

застосовують як основу для подальшого віброелектроіскрового легування з метою утворення зносостійкого шару покриття комплексним методом.

4.5. Висновки до розділу

1. Встановлено склад та технологічні параметри формування композиційних покриттів комплексним методом на сталевій та алюмінієвій матрицях і введенням частинок порошків карбідів вольфраму або титану, а також металів молібдену та титану. Відповідно формувались композиції таких складів: сталь + WC або TiC ; $Al+Ti$ або Mo з максимальним вмістом карбідів до 17% і металів до 22%.

2. Визначено, що для напилення композиційних покриттів системи сталь + WC або TiC оптимальними технологічними режимами є: $I_{\delta}=130...150$ А, $U_{\delta}=35...40$ В, $L=100...110$ мм, $P=0,5...0,6$ МПа; для покриттів системи $Al+Ti$ або Mo : $I_{\delta}=75...85$ А, $U_{\delta}=24...28$ В, $L=90...110$ мм, $P=0,5...0,6$ МПа. Показано, що введення частинок порошків до складу композиційного напиленого покриття призводить до зростання міцності зчеплення з основою на 8...10 %. ВЕО підвищує міцність зчеплення композиційних покриттів з основою в 1,5 раза. Композиційні покриття мають більшу зносостійкість з вмістом порошків: TiC – в 1,4 рази, а WC – в 1,3 рази, а ВЕІЛ в 1,4 рази порівняно із покриттями отриманими зі сталевих дротів.

3. Встановлено, що збільшення енергії розряду призводить до збільшення ваги ΔG і діаметра зразка ΔD , а також шорсткості R_a поверхні деталі з покриттям при обробці в середовищі гранул твердих сплавів Т15К6 і ВК8, при чому дані параметри будуть менші для зразків з суцільного матеріалу.

4. На основі результатів аналізу точності механічної обробки напилених покриттів встановили налагоджувальний розмір обробки d_n , зміну його в часі з урахуванням систематичної $\Delta_{сист}$ та випадкової Δ_{mn} похибок, і визначили часовий період обробки деталей з покриттями у межах встановленого допуску.

Розраховано загальну похибку обробки, питомий внесок первинних похибок в загальну похибку $\Delta_{\text{сум}}$ і запропоновано шляхи їх зменшення.

5. Встановлено, що глибина залягання в одношарових напилених покриттях оброблених поверхонь з найменшою шорсткістю залежить від загальної товщини покриття і збільшується з її зростанням, а оптимальна величина шорсткості оброблених поверхонь для двошарових композиційних покриттів у порівнянні із одношаровими покриттями досягається при знятті меншого припуску на механічну обробку 8–12 %.

РОЗДІЛ 5

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Інженерна методика розрахунку товщини та припусків на механічну обробку деталей з композиційними покриттями, сформованими комплексним методом

Деталі машин, на робочі поверхні яких напилюють газотермічні покриття, у багатьох випадках потребують подальшої механічної обробки різанням для досягнення заданих показників точності розмірів, форми і взаємного розташування поверхонь та їх шорсткості. Ці характеристики, суттєво впливають на якість виконання деталями свого службового призначення у складі машин і механізмів. Досягнення кількісних показників вказаних характеристик на готовій деталі здійснюється шляхом зняття із оброблюваних поверхонь її заготовки шарів матеріалу у вигляді припуску. Визначення раціональних припусків на механічну обробку є важливою техніко-економічною задачею машинобудування, на вирішення якої накладається декілька умов. Так, зокрема, занижені значення припусків призводять до того, що на оброблюваних поверхнях можуть залишатися рештки дефектного шару, а також не гарантовано отримання точних розмірів та заданої шорсткості. Це призводить до зростання кількості браку і, як наслідок, спричиняє здорожчання технологічного процесу виготовлення деталей. З іншого боку, завищені значення припусків призводять до зайвих витрат матеріалів на виготовлення, збільшення трудомісткості обробки, зростання витрат енергоресурсів, різального інструмента, а це, в свою чергу, веде до збільшення собівартості виготовлення деталей машин.

В машинобудуванні застосовують одно та багат шарові покриття [66, 145]. З метою полегшення механічної обробки і зниження витрат на виготовлення деталей з покриттями нами запропоновано формувати двошарові покриття (рис.

5.1, а), а саме нижній робочий композиційний шар із матеріалу дротів та частинок порошку, які вводять із живильника, та верхній технологічний шар, напилений тільки із матеріалу дротів-електродів.

Загальну товщину h_i у випадку напилення одношарових покриттів тільки з матеріалу дротів та двошарових композиційних покриттів із верхнім технологічним шаром відповідно визначають за формулами:

$$h_i = h_o + h_T - Z_{T1}; \quad (5.1)$$

$$h_i = h_o + h_K + h_T - Z_{T2}, \quad (5.2)$$

де h_o – товщина підшару, сформованого віброелектроіскровим легуванням, який використовується для підвищення міцності зчеплення напиленого покриття з основою;

h_K – товщина нижнього робочого композиційного шару;

h_T – товщина верхнього технологічного шару;

Z_{Ti} – величина сумарного припуску на точіння, при якому забезпечується отримання поверхні з мінімальною шорсткістю (індекс $i = 1$ – для одношарового покриття із матеріалу дротів; $i = 2$ – для двошарового композиційного покриттів із верхнім технологічним шаром відповідно).

Товщина підшару залежить від тривалості процесу віброелектроіскрового легування. Встановлено, що при товщині підшару з молібдену 0,03–0,05 мм забезпечується висока міцність зчеплення напиленого покриття з цим підшаром, а також із основою.

Товщину робочого композиційного шару вибирають з огляду на функціональне призначення покриття та умови його експлуатації, використовуючи при цьому відомі формули для розрахунку величини зношування в залежності від заданого терміну роботи покриття та його міцності [145, 146].

Нами експериментально було визначено, що для досліджуваних двошарових покриттів співвідношення товщин технологічного та робочого композиційного шарів становить 1 : 1,87.

Для забезпечення точності розмірів і шорсткості поверхні деталей, зміцнених розробленими покриттями, запропоновано використовувати токарну обробку для технологічного сталевго шару.

Нами було встановлено глибину залягання в покритті обробленої поверхні з мінімальною шорсткістю (п. 4.4). В залежності від товщини покриттів отримано регресійні рівняння, які дозволяють розрахувати величину припуску з умови забезпечення отримання обробленої поверхні з мінімальною шорсткістю для одношарового із матеріалу дротів, та двошарового композиційного покриттів із верхнім технологічним шаром відповідно:

$$z_{T1} = 0,1698x^3 - 0,8472x^2 + 1,6306x - 0,48; \quad (5.3)$$

$$z_{T2} = -0,0617x^3 + 0,1944x^2 + 0,1722x + 0,02, \quad (5.4)$$

де x – загальна товщина покриття.

Для прикладу розглянемо одношарові та двошарові покриття різної товщини. Величини припуску на механічну обробку вказаних покриттів, розраховані за формулами (5.3) і (5.4) і занесені в таблицю 5.1.

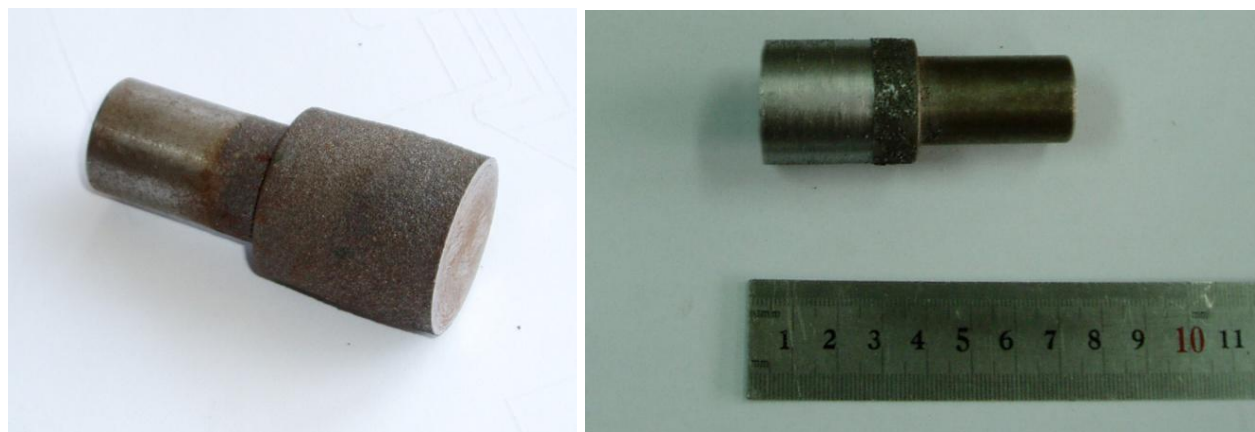
Таблиця 5.1

Результати розрахунку припуску на механічну обробку
покриттів зі сталевю матрицею

| Тип покриття | Загальна товщина покриття, h, мм | | |
|---|----------------------------------|--------------|--------------|
| | 1,0 0,348* | 1,5 0,523 | 2,0 0,697 |
| Одношарове сталеве | 0,473 | 0,633 | 0,751 |
| Двошарове композиційне: робочий шар (Сталь+17% WC); верхній технологічний шар (сталь) | 0,325 | 0,507 | 0,648 |

Примітка: *) Знаменник – товщина технологічного шару в двошаровому композиційному покритті.

Аналіз результатів розрахунку припуску показав, що його величина для двошарових покриттів є меншою у порівнянні з одношаровими. Це спричинено більш високою жорсткістю композиційного шару покриття (рис. 5.1, б).



а)

б).

Рис. 5.1. Загальний вигляд зразка з напиленим двошаровим композиційним покриттям до (а) та після точіння покриття (б).

За призначенням оброблена поверхня з мінімальною шорсткістю та шар покриття, на якому вона формується, може використовуватись як робоча, у випадку, якщо деталь є складовою одиницею пари тертя і не висуваються спеціальні вимоги до її твердості. В іншому випадку цю поверхню застосовують як основу для подальшого віброелектроіскрового легування з метою утворення зносостійкого шару покриття комплексним методом.

Слід зауважити, що визначення припуску з умови отримання обробленої поверхні з мінімальною шорсткістю є раціональним, оскільки така поверхня також забезпечує високу швидкість росту легованого шару.

Структуру сформованого комплексним методом композиційного покриття досліджували на електронному мікроскопі (x500)(рис 5.2). Із рисунка видно, що на поверхні технологічного шару після віброелектроіскрового легування формується так званий білий шар з підвищеною мікротвердістю. Результати вивчення елементного складу легованого шару, сформованого на напиленому шарі покриття, показали, що він містить (масові %): W – 56,7; Fe – 30,5; С –

10,5; O – 2,3. Слід зазначити, що вміст кисню більший в 1,1 раза у порівнянні із суцільним матеріалом.

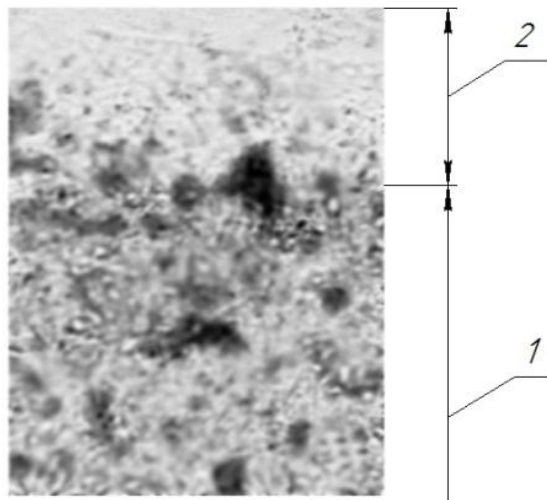


Рис. 5.2. Мікроструктура композиційного покриття сформованого комплексним методом:

1 – напилений робочий композиційний шар; 2 – верхній легований шар.

5.2. Розроблення технології та дослідно-промислової установки для формування композиційних покриттів комплексним методом на деталях типу тіл обертання

Для реалізації спроектованого групового технологічного процесу формування композиційних покриттів комплексним методом (розд. 3) на практиці на деталях типу тіл обертання, розроблено конструкцію та виготовлено дослідно-промислову установку [5] зображено на рис. 5.3.

Установка складається з модулів, які мають таке службове призначення:

– модуль віброелектроіскрового легування слугує для нанесення на зовнішню поверхню бурильних замків підшарів з частинок твердих зносостійких матеріалів, а також для формування розвиненої шорсткості на поверхні замка;

– модуль напилення застосовується для формування композиційного покриття з матеріалу дротів та порошку, який вводять у металоповітряний потік;

– модуль виконавчих рухів використовується для розповсюдження процесів формування покриттів по периметру і довжині зовнішньої циліндричної поверхні деталі шляхом надання їй обертового руху, а металізаційному апарату – поступального руху повздовжньої подачі відносно осі деталі.

Модуль віброелектроіскрового легування виготовлено на базі електромеханічного вібратора, встановленого на пружинній підвісці. На верхній частині вібратора монтується металевий контейнер-електрод на електроізолюваних опорах. Порожнина контейнера заповнюється частинками – гранулами-електродами зі зносостійких матеріалів. Під час легування контейнер-електрод з частинками здійснює коливний рух. В середовищі цих гранул встановлюється деталь, змонтована на спеціальній оправці. Оправку разом з деталлю, що підлягає зміцненню, кріплять в патроні через електроізолюючу втулку та під'єднують через ковзаючий струмопідвід до негативного полюса джерела живлення. При цьому струмопідвід безпосередньо контактує тільки з мідним кільцем оправки. Другий, позитивний полюс джерела живлення, під'єднують до контейнера-електрода.

Модуль напилення містить модернізований нами електродуговий металізатор ЕМ–6, який споряджено порошковим живильником, що дає змогу напилювати композиційні покриття з матеріалів дротів-електродів та порошків.

Схема подачі порошків описана в роботах [2, 3, 5, 10, 14]. До складу цього модуля входять також джерела енергоживлення апарату постійним електричним струмом та стисненим повітрям. Джерелом постійного струму є зварювальний генератор ПСГ-500. Стиснене повітря подається від пневматичного блоку, в складі якого застосовується компресор, споряджений системою підготовки повітря, контрольно-регулюючою апаратурою і запобіжним клапаном.

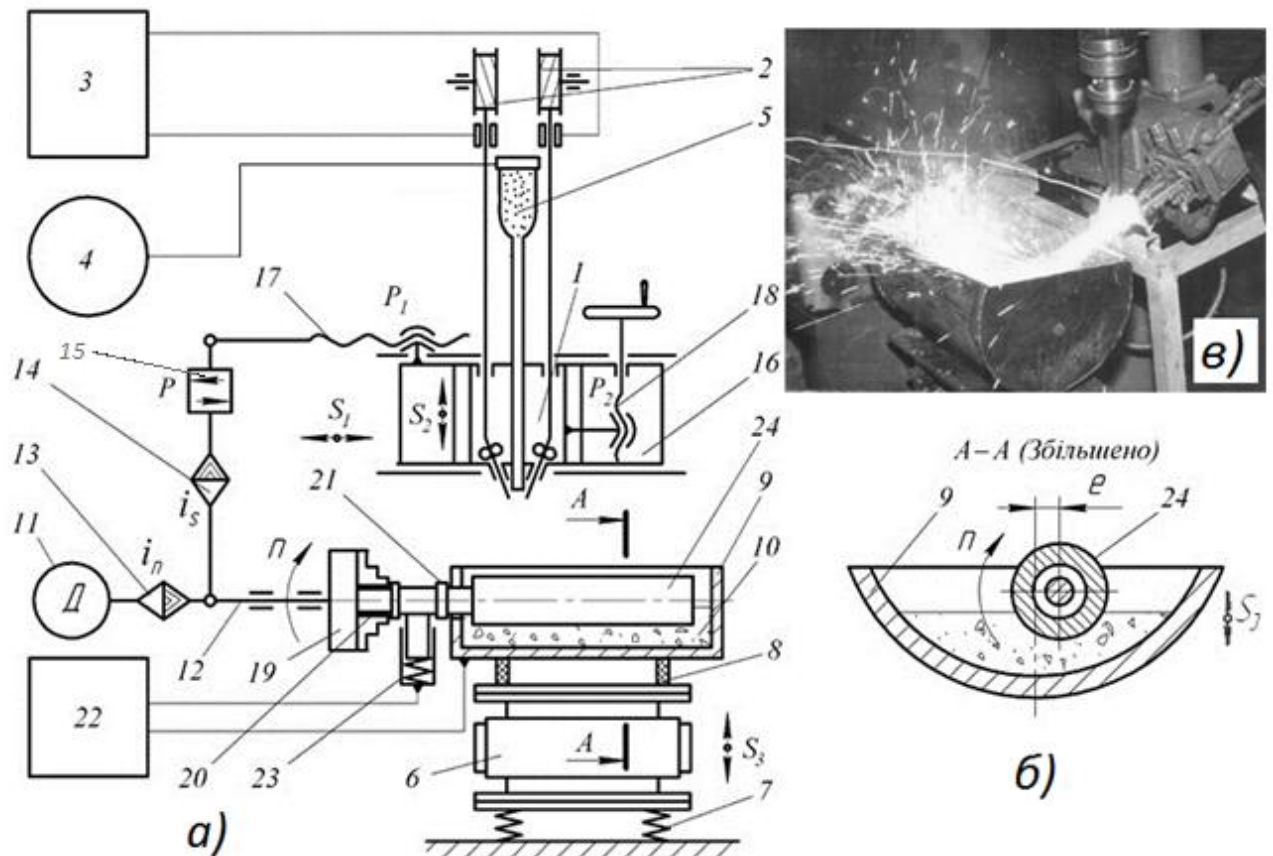


Рис. 5.3. Схема дослідно-промислової установки для формування композиційних покриттів комплексним методом (а), переріз контейнера з деталлю (б) і загальний вигляд робочої зони установки (в):

1 – електродуговий металізатор; 2 – котушки для дротів; 3 – джерело живлення електродугового металізатора; 4 – компресор; 5 – порошковий живильник; 6 – вібратор; 7 – пружинна підвіска; 8 – електроізолюючі опори; 9 – контейнер; 10 – гранули; 11 – електродвигун; 12 – шпindelь; 13 – орган настроювання частоти обертання шпинделя; 14 – орган настроювання механізму подачі; 15 – реверсний механізм; 16 – супорт; 17 – ходовий гвинт повздовжньої подачі; 18 – ходовий гвинт поперечної подачі; 19 – трикулачковий самоцентруючий патрон; 20 – електроізолююча втулка; 21 – оправка для встановлення деталі; 22 – джерело живлення для віброелектроіскрового легування; 23 – ковзаючий струмопідвід; 24 – деталь.

До модуля виконавчих рухів входить електродвигун, органи регулювання частоти обертання шпинделя та подач супорта. Орган регулювання частот обертання виконаний у вигляді коробки швидкостей з пересувними блоками зубчастих коліс. В коробці швидкостей також змонтовано шпиндельний вузол, який складається з пустотілого шпиндельного вала (шпинделя), встановленого на підшипникових герметизованих опорах кочення. На опорному торці переднього кінця шпинделя встановлено трикулачковий самоцентруючий патрон для кріплення оправок, на яких встановлюють деталі, що підлягають зміцненню. На супорті даного модуля розміщено електродуговий металізатор, який встановлюється відносно деталі в поперечному напрямку на відстані, рівній дистанції напилення, за допомогою передачі ходовий гвинт – гайка ковзання поперечного переміщення з ручним приводом. У процесі напилення покриттів супорт надає металізаційному апарату механічне переміщення вздовж поверхні замка, отримуючи рух від шпинделя через ряд зубчастих зачеплень до передачі ходовий гвинт – гайка ковзання поздовжнього переміщення. Регулювання величини цієї подачі виконується відповідним органом настроювання.

Установка працює так. Деталь встановлюють на спеціальній оправці і закріплюють через електроізолюючу втулку в трикулачковому патроні установки. На початку процесу зміцнення вводять в дію елементи модуля віброелектроіскрового легування. При цьому вмикають вібратор для надання коливного руху контейнеру з гранулами, що створюють навколо поверхні деталі “киплячий” електропровідний шар. Відтак у модулі виконавчих рухів надають обертового руху деталі, закріпленій на оправці. Після цього вмикають джерело живлення модуля віброелектроіскрового легування, яке здійснюють шляхом пропускання через створений ланцюг “деталь – електропровідні гранули – контейнер-електрод” імпульсів електричного струму. Електричні іскрові розряди виникають у зоні контактування деталі та гранул через електричний ланцюг при одночасному обертанні оброблюваної деталі та коливанні контейнера-електрода з гранулами. Ці електричні іскрові розряди

забезпечують спрямоване перенесення матеріалу гранул на поверхню деталі, формуючи на ній шар покриття з розвиненою поверхнею – шорсткою та пористою. Застосування гранул твердих сплавів забезпечує отримання твердих зносостійких поверхневих легованих шарів, а додавання до суміші гранул легкоплавких і достатньо в'язких матеріалів дозволяє формувати на оброблюваній поверхні “м'які” припрацювальні структури, які покращують трибологічні характеристики сформованих шарів покриття. Для підвищення ефективності дії припрацювальних шарів на оброблену в такий спосіб на поверхню деталі додатково напилюють алюмінієві покриття, не перериваючи при цьому процесу віброелектроіскрової обробки та електродугового напилення шарів покриття.

5.2.1 Формування композиційних покриттів на зовнішній циліндричній поверхні деталей бурових замків. Композиційні покриття на зовнішній циліндричній поверхні деталей бурових замків формували для підвищення їх зносостійкості та вирівнювання макроелектрохімічної неоднорідності колони алюмінієвих бурильних труб із сталевими замками, яка експлуатується в середовищі бурового розчину, що містить абразивні частинки гірської породи.

Реалізація запропонованої технології зміцнення (рис. 3.2) для бурильних замків на практиці здійснюється за допомогою установки [5], схему якої наведено на рис. 5.3. Для закріплення деталей бурових замків в трикулачковому патроні установки при формуванні композиційних покриттів комплексним методом розроблено конструкцію універсальної оправки (додаток Г).

Цю оправку використовують як для установлення муфти, так і ніпеля бурильного замка [147] за схемою, наведеною в додатку. Згідно з цією схемою муфту або ніпель встановлюють на оправку через втулку циліндричну електроізолюючу. Конічну різьбу муфти та ніпеля захищають від електричних іскрових розрядів відповідною кришкою центруючою електроізолюючою,

встановленою на оправці. Ця кришка центруюча притискається до торця муфти або ніпеля гвинтом спеціальним відповідно. Запропонована конструкція оправки споряджена мідним кільцем, яке розміщене в корпусі електроізолюючому. Мідне кільце з'єднане мідним провідником з трьома підпружиненими мідними контактами, що дотикаються до внутрішніх поверхонь муфти або ніпеля, підводячи до них напругу від джерела живлення. Контакти розміщено у вставках електроізолюючих.

Технологічний процес зміцнення деталей бурильних замків включає такі операції: очищення поверхні замків від сторонніх речовин та окислів; віброелектроіскрову підготовку поверхні та формування на ній твердих зносостійких шарів; електродугове напилення композиційних покриттів з одночасною обробкою їх іскровими розрядами; контроль зовнішнього виду, товщини покриття, геометричних розмірів різьб.

За маршрутом згаданого вище технологічного процесу, на даній установці спочатку виконується друга операція – нанесення віброелектроіскровим легуванням підшару з твердого матеріалу, який має, як було вказано раніше, подвійне функціональне призначення: використовується як засіб підготовки поверхні бурильного замка перед подальшим напиленням покриття, і як засіб надання цій поверхні зносостійких властивостей. Як зміцнюючий матеріал використовувався бій з твердих сплавів ВК8 або Т15К5 з розмірами частинок 2...10 мм. Оптимальні режими віброелектроіскрового легування, які забезпечують достатньо високу продуктивність процесу та якість сформованих шарів, наведені в табл. 5.2.

Після виконання даної операції на поверхні замка утворюється підшар зносостійкого покриття з розвиненою шорсткістю. Висота мікронерівностей коливається у межах від R_z 50 до R_z 160 мкм, а мікротвердість окремих складових покриття складає $H_\mu = 10...12$ ГПа.

Третя операція, що виконується на установці – напилення припрацювального шару на основі алюмінієвмісних композиційних покриттів методом електродугової металізації з одночасним використанням порошкових

матеріалів. Дану операцію виконують не припиняючи віброелектроіскрової обробки.

Таблиця 5.2

Режими віброелектроіскрового легування

| Матеріал гранул | Напруга холостого ходу U_{xx} , В | | Струм короткого замикання $I_{кз}$, А | | Кількість обертів деталі n , хв ⁻¹ | | Час обробки t , хв. | |
|---------------------|--|----|---|-----|--|----|--------------------------|----|
| | Твердий сплав ВК8 | 40 | | 315 | | 30 | | 20 |
| Твердий сплав Т15К6 | 40 | | 315 | | 30 | | 20 | |

Для нанесення припрацювальних шарів використовувалися алюмінієві дроти і порошки титану або молібдену з розмірами частинок 40...70 мкм. Напилення припрацювальних покриттів здійснювали у режимах, вказаних в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Режими електродугового напилення композиційних покриттів

| Покриття | Основний склад покриття, % | | | Напруга холостого ходу U_{xx} , В | Струм короткого замикання $I_{кз}$, А | Дистанція напилення L , м | Тиск повітря P , МПа |
|----------|----------------------------|----|----|--|---|--------------------------------|---------------------------|
| | Al | Ti | Mo | | | | |
| AlTi20 | 80 | 20 | — | 38 | 250 | 0,09 | 0,5 |
| AlMo20 | 80 | — | 20 | 35 | 280 | 0,10 | 0,5 |

Після завершення зміцнювальної обробки виконувалась контрольна операція, на якій перевіряли якість сформованого композиційного покриття, геометричні розміри зміцнених деталей бурильних замків, а також проводився

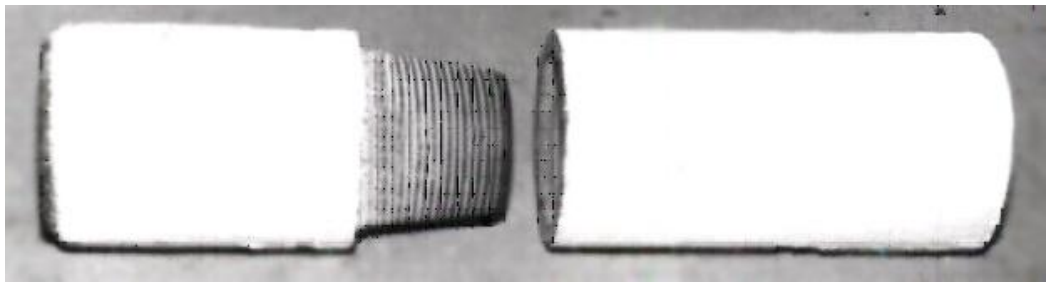
контроль різьбових поверхонь муфти і ніпеля різьбовими калібрами для конічних різьб і гладкими калібрами конусності поверхні конічних різьб. Дані контролю підтвердили відсутність термічних деформацій приєднувальних різьбових частин зміцнених деталей замків.

Зразки з покриття AlTi20 та AlMo20 випробовували в умовах абразивного зношування на машині тертя СМЦ-2 за схемою “диск – колодка”, що з достатнім ступенем точності моделює роботу бурильного замка в обсадній колоні. Матеріалом диска і колодки є сталь 40ХН, термооброблена до твердості НВ 285...300. Випробовування проводили за методикою, описаною в розділі 3.

Покриття AlTi20 і AlMo20 на зовнішній поверхні диска формували за розробленою технологією з використанням віброелектроіскрового легування і без нього з подальшою механічною обробкою чистовим точінням з метою досягнення необхідних розмірів диска. Кінцева товщина покриттів перед випробовуваннями на зношування становила 0,6...0,8 мм.

Аналіз отриманих залежностей свідчить, що зносостійкість алюмінієвмісних покриттів після віброелектроіскрового легування, вища, ніж для сталі 40ХН. Крім того, термін припрацювання в них є значно коротшим. Підвищена зносостійкість алюмінієвмісних покриттів пояснюються високою твердістю окремих їх складових. Збільшення зносостійкості таких покриттів після легування у порівнянні з необробленими іскровими розрядами покриттями забезпечується формуванням в їх складі твердих складових.

За розробленою технологією було зміцнено партію деталей бурильних замків типу ЗШ-178 [147], зображених на рис. 5.4.



а)

б)

Рис. 5.4. Деталі бурового замка із сформованим композиційним покриттям на зовнішній циліндричній поверхні:

а – ніпель; б – муфта.

Випробування замків провели під час роторного буріння свердловини у виробничих умовах. У ході промислових випробовувань при роторному бурінні встановлено, що зміцнення зовнішньої циліндричної поверхні бурильних замків за розробленою технологією на спроектованій установці дозволяє підвищити ресурс їх роботи в середньому в 1,4 рази порівняно із серійними.

5.2.2 Формування композиційних покриттів на зовнішній циліндричній поверхні захисних втулок. Захисні втулки, які відносять до змінних деталей, встановлюють на валу відцентрового насоса в зоні розташування сальникового ущільнення з метою захисту цього вала від зношування. Під час роботи насоса втулки контактують з набивкою сальникового ущільнення і зношуються, захищаючи вал насоса. Заміна втулки вимагає розбирання насоса. Для підвищення ресурсу роботи втулок і зниження затрат на ремонт насоса на їх зовнішню циліндричну поверхню наносять покриття. Згідно розробленого нами технологічного процесу (розділ 3), що містить такі операції: віброелектроіскрове легування основи молібденом, електродугове напилення робочого композиційного шару з матеріалу сталевих дротів та введення в металоповітряний потік частинок карбіду вольфраму, верхнього технологічного шару із сталевих дротів, який підлягав механічній обробці, віброелектроіскрове легування твердим сплавом обробленої поверхні покриття на установці (рис. 5.3) було сформовано композиційне покриття на зовнішній

циліндричній поверхні захисних втулок валів відцентрових насосів. При нанесенні покриття втулки монтували на оправці (додаток Г).

Після завершення формування покриття втулку знімали з оправки і піддавали подальшій механічній обробці – шліфуванню, для отримання шорсткості зовнішньої циліндричної поверхні Ra 0,63 мкм. Випробовування втулок, зміцнених композиційним покриттями проводили на стенді (розділ 3). Результати випробовувань показали підвищення їх ресурсу роботи в 1,5 рази порівняно із серійними.

5.3. Розроблення технології віброелектроіскрового легування нікелем гранул карбїду вольфраму, які застосовують для зміцнення породоруйнівних елементів бурових долїт

5.3.1 Технологїчний процес віброелектроіскрового легування нікелем гранул карбїду вольфраму. Буровї долота, в тому числі шарошкові, широко застосовуються для буріння нафтових, газових та інших типів свердловин. Породоруйнівні елементи долїт взаємодїють із гїрською породою на вибої свердловини і здїйснюють її механїчне руйнування. Внаслідок цього відбувається зношування породоруйнівних елементів (зубцїв): поступова зміна їх геометричних розмірів і форми. Інтенсифїкації процесу зношування сприяють екстремальні умови роботи бурових долїт, які є інструментом разового використання.

Для підвищення зносостїйкостї породоруйнівних елементів бурових долїт застосовують об'ємне відцентрове армування заготовок гранулами твердого сплаву [11, 12, 37] або поверхневе армування (наплавлення) [37]. В процесї армування гранулами карбїду вольфраму (релїту) відбувається їх змочування, розчинення і взаємодїя з розтопленою сталлю 18ХН2МФЛ, нагрітою до температури 1620 °С. Внаслідок розчинення гранул твердого сплаву в розтопленїй сталї відбувається легування матрицї, а також утворення крихких

сполук. Все це призводить до нераціонального використання дороговартісного карбїду вольфраму та спричиняє погіршення фізико-механічних властивостей матеріалу армованої зони.

Для зменшення розчинення гранул твердого сплаву в розтопленій сталі та підвищення міцності закріплення їх в матриці запропоновано здійснювати їх плакування нікелем. На основі патенту № 671655 [15] нами розроблено технологічний процес віброелектоіскрового легування гранул релїту нікелем.

Технологічний процес містить операції, що описані в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Технологічний маршрут процесу ВЕІЛ нікелем гранул карбїду вольфраму

| Назва і зміст операції | Обладнання |
|---|----------------------------------|
| 1. Термічна Просушити порошок карбїду вольфраму при температурі 200–250 °С на протязі 1,5–2 годин | Піч муфельна |
| 2. Віброелектоіскрова Провести віброелектоіскрове легування нікелем гранул карбїду вольфраму (товщина легованого шару 0,02 – 0,3 мм) | Модернізована установка для ВЕІЛ |
| 3. Контрольна 3.1. Візуальний контроль якості нікелевого покриття на гранулах карбїду вольфраму 3.2. Металографічний аналіз гранул з покриттям на мікрошліфах | Лупа Мікротвердомір ПМТ-3 |

Формування нікелевого шару на зернах релїту здійснювали методом віброелектоіскрового легування за розробленою нами технологією. Циліндричний електрод, виготовлений з нікелю, занурювали в середовище гранул релїту на установці описаній в патенті [15] (розд. 3). Зерна релїту розміщували в контейнері, який здійснював коливальний рух. Циліндричний

електрод та контейнер футеровали накладками з нікелю. Порожнину контейнера, в якому розташований циліндричний електрод, заповнювали гранулами реліту. За допомогою струмопроводів подавали напругу електричного струму на контейнер та електрод від джерела живлення. При проходженні струму через електричний ланцюг: “нікелевий електрод-анод, гранули реліту, нікелевий контейнер-катод”, між гранулами реліту та поверхнею нікелевого електрода виникають електроіскрові заряди, котрі забезпечують спрямоване перенесення нікелю на поверхню гранул реліту, формуючи таким чином покриття.

5.3.2 Поверхнєве армування робочих поверхонь зубців бурових доліт легованими гранулами карбїду вольфраму. Поверхнєве армування є одним з ефективних методів підвищення зносостійкості зубців шарошок бурових доліт, яке реалізується шляхом наплавлення на робочі поверхні зубців зносостійкого твердого матеріалу – реліту [37]. Відомо, що основними структурними складовими цього матеріалу є монокарбїд вольфраму WC і евтектика WC+W₂C. З метою зниження швидкості розчинення реліту в процесі наплавлення у ванночці розтопленої сталі на робочій поверхні зубця застосували поверхнєве легування гранул реліту нікелем. Наплавлення клиноподібних зубців здійснювали за стандартною технологією, прийнятою при виготовленні бурових шарошкових доліт на машинобудівних підприємствах.

В роботі нами було проведено також порівняльні дослідї з випробування на знос зубців з наплавленою робочою поверхнею за найбільш оптимальною схемою збільшення площі армування за шириною зубця з використанням як гранул реліту без легування, так і поверхнєволегованих нікелем. Відомо, що нікель в цьому випадку виконує захисну функцію, запобігаючи гранули карбїду вольфраму від інтенсивного розчинення в процесі наплавлення в металі зварювальної ванни та від дифузії вуглецю з нього, і цим самим зберігаючи зносостійкі властивості реліту та покращуючи його закріплення у сталевій

матриці. На основі обробки результатів планування експерименту були побудовані математичні моделі

$$y = 2,79 - 0,52x_1 - 0,15x_2 - 0,29x_3 - 0,22x_4 \quad [8]; \quad (5.5)$$

$$y_n = 2,23 - 0,42x_1 - 0,19x_2 - 0,15x_3 - 0,27x_4. \quad (5.6)$$

Графічна ілюстрація результатів отриманих моделей зношування, від двох змінних факторів, прийнявши значення двох інших на нульовому рівні, наведена в додатку Ж.

Наплавлення гранул реліту, покритих віброелектроіскровим легуванням нікелем, на робочу поверхню зубців за оптимальних значень параметрів технологічного процесу, встановлених в даній роботі, дозволили збільшити їх зносостійкість в 1,21 раза у порівнянні із наплавленими зубцями релітом без нікелевого покриття за стандартною технологією.

5.4. Практичне застосування технології формування композиційних покриттів комплексним методом і розробленого обладнання

Пріоритет і технічна новизна розробок, отриманих в дисертації підтверджена: 3 авторських свідоцтва; 1 деклараційний патент; 1 патент на винахід; 1 патент на корисну модель; 1 авторське право на комп'ютерну програму (додаток А).

Розроблену технологію формування композиційних покриттів комплексним методом на деталях типу тіл обертання впроваджено в ТЗОВ Міжгалузевий науково-виробничий центр «Епсілон ЛТД», м. Івано-Франківськ.

Результати стендових випробовувань захисних втулок валів відцентрових насосів показали підвищення їх ресурсу роботи в 1,5 рази порівняно із серійними (додаток З).

Технологічний процес і обладнання для формування композиційних покриттів комплексним методом на бурильних замках впроваджені в товаристві з обмеженою відповідальністю «Нафтогазтехнологія», м. Івано-Франківськ.

Результати промислових випробовувань бурильних замків ЗШ-178 з композиційними покриттями при роторному бурінні показали підвищення ресурсу роботи в 1,4 рази порівняно із серійними (додаток З).

Наукові результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри технології нафтогазового машинобудування Інституту інженерної механіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу при підготовці бакалаврів, спеціалістів і магістрів за напрямком «Інженерна механіка» (додаток Ж).

Як основна і додаткова література при вивченні вказаних навчальних дисциплін використовуються такі праці [3, 5, 7].

Таким чином, основні результати дисертаційної роботи широко використовуються в навчальному процесі кафедри технології нафтогазового машинобудування Інституту інженерної механіки ІФНТУНГ, що сприяє підвищенню рівня професійної підготовки студентів (додаток З).

Економічний ефект від впровадження електродугового напилення композиційних покриттів із суцільних дротів і порошків, які вводять із живильника в металоповітряний потік буде отримано за рахунок більш низької ціни на суцільні дроти та порошки в порівнянні із ціною на порошкові дроти, прийнявши їх склад (аналогічно як для композиційних покриттів): 40 % – матриця; 60% – наповнювач:

$$E = C_{nd} - C_d - C_n = C_n - (0,4 \cdot C_d + 0,6 \cdot C_n) = 173,65 - (0,4 \cdot 8,94 + 0,6 \cdot 149,3) = 80,494 \$.$$

де C_{nd} – ціна 1 кг порошкового дроту із вмістом порошку WC (173,65 \$);

C_d – ціна 1 кг суцільного сталевих дротів (8,94 \$);

C_n – ціна 1 кг порошку WC (149,3 \$);

Ціни прийнято за даними ТзОВ МНВЦ "Епсілон ЛТД", офіційного та ексклюзивного представника компанії "Lastek Belgium n.v." (Бельгія);

При курсі долара 24 грн за 1\$ отримаємо економічний ефект у сумі $E = 80,494 \cdot 24 = 1932$ грн при напиленні 1 кг композиційного покриття електродуговим методом із суцільних дротів та порошку.

5.5 Висновки до розділу

1. Розроблено інженерну методику розрахунку припусків, з умови забезпечення отримання обробленої поверхні з мінімальною шорсткістю для одношарових та двошарових з верхнім технологічним шаром.

2. Розроблено конструкцію дослідно-промислової установки, оснащення та технологію для формування композиційних покриттів комплексним методом на робочих поверхнях бурових замків та захисних втулок валів відцентрових насосів. Встановлено, що ці деталі з композиційними покриттями мають вищу зносостійкість порівняно із серійними у 1,4 та 1,5 раза відповідно.

3. Розроблено технологію ВЕІЛ гранул карбіду вольфраму, які застосовують для об'ємного та поверхневого армування поверхонь породоруйнівних елементів бурових доліт, що забезпечує підвищення їх зносостійкості на 21 %.

5. Результати досліджень впроваджено у виробництво та навчальний процес.

6. Економічний ефект при напиленні 1 кг композиційного покриття із суцільних дротів та порошку карбіду вольфраму запропонованим методом електродугової металізації становить $E = 1932$ грн на 1 кг покриття у порівнянні з використанням порошкових дротів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі проведеного аналізу умов роботи бурового і нафтогазопромислового обладнання, існуючих технологій виготовлення і зміцнення деталей, науково обґрунтовано доцільність і перспективність, з точки зору підвищення якості поверхні, сумісного застосування технології електродугової металізації із суцільних дротів з введенням із живильника частинок порошку в металоповітряний потік та віброелектроіскрового легування. Теоретично обґрунтовано та розв'язано науково-технічну задачу формування композиційних покриттів комплексним методом, що дало можливість зменшити витрати на зміцнення у порівнянні з існуючими технологіями.

1. Вперше встановлено математичні залежності параметрів руху та температури частинок порошку, введених із живильника у металоповітряний потік з неоднорідним розподілом швидкостей та температур, від технологічних параметрів напилення композиційних покриттів електродуговим методом, а також на основі ймовірно-математичного моделювання обґрунтовано площу одиничних розрядів при віброелектроіскровому легуванні.

2. Для досліджуваних матеріалів частинок порошку (алюміній, титан, молібден, карбід титану, карбід вольфраму) визначено оптимальні технологічні режими введення їх у неоднорідний металоповітряний потік для забезпечення потрапляння цих частинок у центр області напилення. Згідно з умовами запропонованого способу напилення встановлено, що температура частинки порошку в кінці дистанції є дещо менша від температури частинок, утворених розпиленням із суцільних дротів-електродів, але цілком достатня для забезпечення формування якісних композиційних покриттів і становить 500...1000 °С.

3. Розроблено новий ефективний груповий технологічний процес формування композиційних покриттів комплексним методом шляхом поєднання електродугового напилення із суцільних дротів з введенням із

живильника частинок порошку в металоповітряний потік та віброелектроіскрового легування (з послідовним або одночасним виконанням вказаних процесів). Встановлено, що при напиленні композиційних покриттів із матеріалу дротів і частинок порошку електричні параметри дуги змінюються таким чином: для металевих частинок (Ti, Mo) напруга на дузі зменшується на 25...30 %, а для частинок карбідів (TiC, WC) напругу на дузі необхідно збільшувати в 1,3 рази.

4. Показано, що найбільш суттєвими чинниками в керуванні технологічним процесом формування композиційних покриттів при їх віброелектроіскровому легуванні в середовищі гранул твердого сплаву ВК8 або Т15К6 є тривалість процесу обробки в іскрових розрядах, напруга початку розряду і ємність конденсаторної батареї. Встановлено, що максимальна інтенсивність легування покриття має місце впродовж перших 10 – 20 хвилин, після чого процес уповільнюється і стабілізуються величини діаметра зразка та шорсткості поверхні. При цьому діаметр зразків з напиленим покриттям зростає в 1,48 рази повільніше порівняно із зразками з суцільного матеріалу.

5. Встановлено, що при точінні одношарових напилених покриттів глибина залягання обробленої поверхні з мінімальною шорсткістю залежить від загальної товщини покриття. Для двошарових композиційних покриттів, що складаються з робочого композиційного та верхнього технологічного шарів, який піддається механічній обробці, ця поверхня розташована ближче до зовнішньої поверхні ніж в одношарових на 8...12 %. При точінні напилених покриттів домінуючий вплив на точність обробки мають похибки від розмірного спрацювання та теплової деформації різця.

6. Вперше встановлено різницю електродних потенціалів між окремими шарами двошарових композиційних покриттів і показано, що максимальна різниця у електроліті з високим опором може сягати до 75 мВ. За результатами електрохімічних вимірювань встановлено, що композиційні покриття зберігають роботоздатність при різних видах навантаження як на розтяг, так і кручення, не знижуючи рівня допустимих напружень для основи.

7. Встановлено, що теплові умови формування композиційних покриттів комплексним методом не впливають негативно на фізико-механічні властивості металу основи, а також не призводять до зміни геометричних розмірів приєднувальних різьбових частин муфти і ніпеля, а розроблений технологічний процес зміцнення бурильних замків є ефективним для застосування як при виготовленні, так і при відновленні деталей.

8. Розроблено інженерну методика розрахунку припусків на механічну обробку композиційних покриттів на деталях типу тіл обертання, сформованих комплексним методом. Запропоновано конструкцію установки і технологію зміцнення зовнішньої циліндричної поверхні деталей бурильних замків шляхом формування композиційних покриттів з високою зносостійкістю та корозійною стійкістю комплексним методом. Стендові випробовування захисних втулок валів відцентрових насосів показали підвищення їх стійкості в 1,5 рази порівняно із серійними. Розроблену технологію формування покриттів комплексним методом на деталях типу тіл обертання передано і впроваджено в ТзОВ МНВЦ «Епсілон ЛТД», ТзОВ «Нафтогазтехнологія». Промислові випробовування бурових замків показали збільшення часу їх роботи в 1,4 рази порівняно із серійним. Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі ІФНТУНГ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кустов В. В. Аналіз шкідливих факторів при нанесенні металізаційних покриттів / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як, О. А. Гевка // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2000. – Вип. 37, Т. 5. – С. 131–133.
2. Кустов В. В. Теоретичне обґрунтування розміщення дозуючої трубки порошкового живильника при електродуговому напиленні композиційних покриттів / В. В. Кустов // Нафтогазова енергетика. – 2010. – № 2 (13). – С. 105–108.
3. Кустов В. В. Моделювання руху частинок порошку при напиленні покриттів електродуговим методом / В. В. Кустов, М. В. Маковійчук, Л. Я. Роп'як // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк, 2011. – Вип. 41. – С. 188–197.
4. Григорчук Л. Дослідження процесу зміцнення поверхонь деталей машин обробкою іскровими розрядами / Л. Григорчук, В. Кустов, М. Осипчук, Л. Роп'як // Вісник Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя. – 2011. – Т. 16, 3. – С. 116–122.
5. Кустов В. В. Технологія і установка для комплексного зміцнення замків бурильних труб / В. В. Кустов // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – № 2 (39). – С. 33–39.
6. Кустов В. В. Дослідження руху та нагрівання частинок порошку в процесі напилення композиційних покриттів електродуговим методом / В. В. Кустов, М. В. Маковійчук, Л. Я. Роп'як // Наукові нотатки. – Луцьк, 2014. – № 44. – С. 154–163.
7. Кустов В. В. Вплив технологічних параметрів обробки в іскрових розрядах на показники газотермічних покриттів / В. В. Кустов, І. О. Шуляр, А. К. Смаглюк, П. І. Войтенко // Нафтогазова енергетика. – 2014. – № 1. – С. 105–111.

8. Семеген О. М. Дослідження та моделювання впливу конструктивного оформлення і технологічних параметрів виготовлення на показники зношування армованого озброєння шарошкових доліт / О. М. Семеген, З. М. Одосій, В. В. Кустов // Проблеми міцності. – 2014. – № 4 (430). – С. 162–171.

9. Кустов В. В. Аналіз точності токарної обробки зовнішньої циліндричної поверхні втулок / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1, Ч. 1 (90). – С. 86–93.

10. А. с. 788503 СССР, МКИ³ В 05 В 7/22. Установка для напыления комбинированных покрытий электродуговым методом / П. Ф. Шуленок, В. В. Кустов, (СССР); заявитель и патентообладатель ИФИНГ. – № 2788539/23-05; заявл. 25.06.79.

11. А. с. 1197249 СССР, МКИ³ В 22 D 19/02. Способ получения армированных отливок / Ю. Н. Бугай, В. В. Кустов, А. В. Быков, А. М. Гасалов, Р. Л. Алавердов (СССР); заявитель и патентообладатель ИФИНГ. – № 3505285/22-02; заявл. 27.10.82.

12. А. с. 1491609 СССР, МКИ³ В 2 D 27/02. Устройство для получения армированных отливок / А. М. Абдулзаде, Р. Т. Карпик, Ю. Н. Бугай, Ю. Д. Петрина, В. В. Кустов (СССР); заявитель и патентообладатель ИФИНГ. – № 4344055/31-02; заявл. 23.11.87; опубл. 07.07.89, Бюл. № 25.

13. Пат. 39303 Україна, МПК G 01 N 27/30. Мікроелектрод для електрохімічних вимірювань / Роп'як Л. Я., Петрина Д. Ю., Шуляр І. О., Кустов В. В., Гусак В. М.; заявник і патентовласник ІФДТУНГ. – № 2000010334; заявл. 20.01.00; опубл. 15.06.01, Бюл. № 5.

14. Пат. 40784 Україна, МПК С 23 С4/04, 26/02, 28/00. Установка для напыления композиционных покрытий электродуговым методом / Кустов В. В., Роп'як Л. Я.; заявник і патентовласник ІФДТУНГ. – № 2000010333; заявл. 20.01.00; опубл. 15.12.03, Бюл. № 12.

15. Пат. 67165 Україна, МПК В 05 D 3/14. Спосіб підготовки поверхні деталей перед газотермічним напыленням покриттів / В. В. Кустов, Л. Я.

Роп'як, А. К. Смаглюк; заявник і патентовласник: Кустов В. В. – № u201107081; заявл. 06.06.11; опубл. 10.02.12, Бюл. № 3.

16. Компютерна програма «Програма підбору чисел зубів змінних зубчастих коліс гітар» («Gitara_Zmin_Zub_Kolis_001_KIS») / В. Я. Роп'як, І. С. Когут, Л. Я. Роп'як, В. В. Кустов // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 39064; дата реєстрації 07.07.2011.

17. Кустов В. В. Оптимізація процесу електродугового напилення композиційних покриттів / В. В. Кустов // Конференція професорсько-викладацького складу інституту нафти і газу: наук.-техн. конф. 1992 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 1992. – С. 69.

18. Бугай Ю. Технологія виготовлення дискових шарошок / Ю. Бугай, В. Кустов, Р. Карпик // Проблеми і шляхи енергозабезпечення України: міжнар. наук.-практ. конф., 7-10 груд. 1993 р.: збірник статей. – Івано-Франківськ, 1995, Частина 2. – С. 17–21.

19. Кустов В. В. Дослідження антифрикційних властивостей полімерного волокнистого матеріалу / Р. Т. Карпик, О. А. Лук'яненко, Л. Я. Роп'як, І. М. Чорній, С. М. Левицький // Конференція професорсько-викладацького складу інституту нафти і газу : наук.-техн. конф. 1996 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 1996, частина II. – С. 71.

20. Кустов В. В. Дослідження траєкторії руху частинок порошку в потоці транспортуючого газу / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як, В. М. Сенічак // Конференція професорсько-викладацького складу ІФДТУНГ: наук.-техн. конф. 2000 р. : тези доп. – Івано-Франківськ, 2000. – С. 63–64.

21. Кустов В. В. Динамічні характеристики процесу віброелектроіскрового легування / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції “Наука і освіта ‘2004”, 10-25 лютого 2004 р., / Технічні науки. Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2004, Т. 63. – С. 47–48.

22. Кустов В. В. Підвищення довговічності замків бурильних труб / В. В. Кустов // Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці «ІФНТУНГ-

40»: міжнар. наук.-техн. конф., 16-20 квіт. 2007 р.: анотації – Івано-Франківськ, 2007. – С. 187.

23. Кустов В. Математичне моделювання процесів нагрівання і руху частинок порошку при електродуговому напиленні композиційних покриттів / В. Кустов, Л. Роп'як // Тези доповідей V Всеукраїнської наук.-практ. конф., 2010 р. – Київ: Університет «Україна», 2010. – С. 128.

24. Кустов В. Пристрій для автоматизації процесу напилення покриттів / В. Кустов, Л. Роп'як, А. Смаглюк // Матеріали міжн. наук.-техн. конф. «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», 19-21 травня 2010 р.: тези доповідей. – Тернопіль, 2010. – С. 174-175.

25. Кустов В. В. Виброэлектроискровой способ подготовки поверхности деталей перед газотермическим напылением покрытий / В. В. Кустов // Материалы VII междунар. науч.-техн. конф. «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта», 22-25 ноября 2011 г.: тезисы докл. – Новополюк: НПУ, 2011. – С. 204–205.

26. Кустов В. В. Розрахунок температури частинок порошку в електричній дузі при напиленні композиційних покриттів електродуговим методом / В. В. Кустов, В. Ю. Шурховецький // Тези доп. XII всеукр. Молодіжної наук.-техн. конф. «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (секція II «Технологія машинобудування»). – К., 2012. – С. 65–67.

27. Кустов В. В. Установка для напилення композиційних покриттів електродуговим методом / В. В. Кустов // Інтелектуальний продукт вчених, винахідників і раціоналізаторів Прикарпаття, 2011: каталог перспективних винаходів, корисних моделей, промислових зразків і раціоналізаторських пропозицій Галицьких кмітливців. – Івано-Франківськ, 2012. – С. 20.

28. Кустов В. В. Оцінка точності механічної обробки деталей з напиленим покриттям / В. В. Кустов // Прогресивні технології в машинобудуванні : III Всеукраїнська наук.-техн. конф. Національний університет “Львівська політехніка” 2 – 6 лютого 2015 р.: Збірник наукових праць, 2015. С. 66–67.

29. Термическая обработка в машиностроении: справочник / Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Гахштадта. – М. : Машиностроение, 1980. – 783 с.
30. Пашечко М. И. Формирование и фрикционная стойкость эвтектических покрытий / М. И. Пашечко, В. М. Голубец, М. В. Чернец. – К.: Наукова думка, 1993. – 344 с.
31. Голубець В. М. Технологічні методи поверхневого зміцнення металічних конструкційних матеріалів: [Навч. посібник] / В. М. Голубець. – Львів: ВТФ «Друксервіс», 2000. – 178 с.
32. Ясь Д. С. Методи відновлення та підвищення довговічності деталей машин легкої промисловості / Д. С. Ясь. – К.: УМК ВО, 1992. – 364 с.
33. Тимохова О. М. Исследование восстановления деталей машин методами напыления и термической обработки / О. М. Тимохова // Сб. науч. тр.: материалы науч.-техн. конф. (13–15 апр. 2010 г.). - Ухта, 2010. Ч. 2. - С. 116–118.
34. Диффузионная металлизация плазменных покрытий / Г. В. Земсков, А. А. Коган, А. А. Слободянюк, А. А. Синьковский // Защитные покрытия на металлах. – 1980. – № 14. – С. 69–71.
35. Чернець М. Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання: у 3 т./ М. Чернець, М. Пашечко, А. Невчас. – Т. 2.: Поверхневе зміцнення конструкційних матеріалів трибосистем ковзання.– Дрогобич: Коло, 2001. – 512 с.
36. Лучка М. В. Износостойкие диффузионно легированные композиционные покрытия / [М. В. Лучка, М. В. Киндрачук, П. И. Мельник и др.]. – К.: Техника, 1983. – 163 с.
37. Бугай Ю. Н. Центробежно-армированный породоразрушающий буровой инструмент / Ю. Н. Бугай, И. В. Воробьев. – Львов: Выща шк. Изд-во при Львов ун-те, 1989. – 208 с.
38. Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление / Пер. с японского В. Н. Попова. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

39. Восстановление и повышение износостойкости и срока службы деталей машин / Под. ред. В. С. Попова. – Запорожье: Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2000, – 394 с.

40. Пулька, Ч. В. Технологічна та енергетична ефективність індукційного наплавлення тонких сталевих дисків: дис. доктора техн. наук: 05.03.06 / Пулька Чеслав Вікторович. – К.: 2006. – 368 с

41. Савуляк В. І. Вплив швидкості наплавлення на зносостійкість високовуглецевих шарів, нанесених методом електродугового наплавлення з використанням вуглецевих волокнистих матеріалів / В. І. Савуляк, В. Й. Шенфельд, О. Б. Янченко // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Луцьк: Луцький нац. техн. ун-т, 2013. – Вип. 41(1). – С. 224 – 229.

42. Лищинський С.П. Повышение износостойкости замков бурильных труб / С. П. Лищинський, А. А. Мардахаева, Б.В. Данильченко, А.И. Белый // Нефтяная и газовая промышленность. – 1984. – № 1. – С. 28–30.

43. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

44. Кудинов В. В., Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В. В. Кудинов, В. М. Иванов. – М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.

45. Кречмар Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс / Э. Кречмар. – М.: Машиностроение, 1966. – 432 с.

46. Антошин Е. В. Газотермическое напыление покрытий / Е. В. Антошин. – М.: Машиностроение, 1974. – 97с.

47. Davis J. R. Handbook of Thermal Spray Technology / J. R. Davis, 2004. – 338 p.

48. Вольперт Г. Д. Покрытие распыленным металлом (металлизация) / Г. Д. Вольперт. – М.: Промстройиздат, 1957. – 268 с.

49. Елизаветин М. А. Технологические способы повышения долговечности машин / М. А. Елизаветин, Э. А. Сатель. – М.: Машиностроение, 1969. – 399 с.

50. Хасуй А. Техника напыления / Пер. с японского С. Л. Масленникова. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
51. Heimann Robert B. Plasma Spray Coating / Robert B. Heimann. VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1996 – 339 p.
52. Герасименко В. М. Перспективные методы получения износостойких и коррозионно-стойких покрытий газотермическим напылением / В. М. Герасименко. – К., 1985. – 64 с. (Обзор. информ. / УкрНИИНТИ). Сер. 9. Технология и оборудование сварочного производства.
53. Похмурський В. І. Електродугові відновні та захисні покриття / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік, Г. В. Похмурська, І. Й. Сидорак. – Львів, Національна академія наук України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. – 2005. – 192 с. + вклейка 8 с.
54. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик, Ю. С. Борисов, А. С. Мнухин, М. Д. Никитин. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-е, 1985. – 197 с.
55. Катц Н. В. Металлизация распилением / Н. В. Катц, Е. В. Антошин, Д. Г. Вадивасов, Г. Д. Вольперт, Г. Д. Камионский. – М.: Машиностроение, 1966. – 200 с
56. Петров С. В. Плазменное газоздушное напыление / С. В. Петров, И. Н. Карп. – К: Наукова думка, 1993. – 495 с.
57. Борисов Ю. С., Плазменные порошковые покрытия / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова. – К.: Техніка, 1986. – 223 с..
58. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – К.: Наукова думка, 1987. – 544 с.
59. Анциферов В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин // Под ред. Б. С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
60. Сидоров А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. – М.: Машиностроение, 1987. – 190 с.

61. Антонюк В. С. Оптимизация технологических параметров процесса формирования упрочняющих покрытий / В. С. Антонюк, С. П. Выслоух, В. А. Мазур, С. С. Самотугин // Технологические системы. – № 4. – 2003. – С. 44 – 47.
62. Прайт Кулд. Износостойкость порошковых материалов и покрытий / Кулд Прайт. – Таллин: Валгус, 1988. – 156 с.
63. Полевой С. Н., Евдокимов В. Д. Упрочнение металлов: Справ./ С. Н. Полевой, В. Д. Евдокимов. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
64. Куприянов И. Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И. Л. Куприянов, М. А. Геллер. – Мн.: Навука і техника, 1990. – 176 с.
65. Лабунец В. Ф. Износостойкие боридные покрытия / В. Ф. Лабунец, Л. Г. Ворошнин, М. В. Киндрачук. – К.: Техніка, 1989. – 159 с.
66. Ющенко К. А. Інженерія поверхні / К. А. Ющенко, В. С. Борисов, В. Д. Кузнецов, В. М. Корж. – К.: Наукова думка, 2007. – 558 с.
67. Власов В. М. Работоспособность упрочнённых трущихся поверхностей / В. М. Власов. – М.: Машиностроение, 1987. – 304 с.
68. Стецько А. Є. Технологічне забезпечення ресурсу роботи виготовлених і відновлених деталей: [монографія]: / А.Є. Стецько – Львів: Видавнична компанія «АРС». – 2013 – 240 с.
69. Яким Р. С. Науково-технічні основи технології виготовлення тришарових бурових доліт та підвищення їх якості і ефективності: монографія / Р. С. Яким, Ю. Д. Петрина, І. С. Яким. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – 384 с.
70. Комбинированные электролитические покрытия / В. Ф. Молчанов, Ф. А. Аюпов, В. А. Вандышев, В. М. Дзыцюк. – К.: Техніка, 1976. – 176 с.
71. Кудинов В. В. Плазменные покрытия / В. В. Кудинов/ – М.: Наука, 1977. – 184 с.

72. Бартенов С. С. Детонационные покрытия в машиностроении / С. С. Бартенов, Ю. П. Федько, А. И. Григорьев. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-е, 1982. – 215 с.

73. Пат. 30382 Україна, МПК (2006) С 23 С 4/00. Пристрій для електродугового напилення / О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, С. М. Шумов; заявник і патентовласник НУК ім. адмірала Макарова. – № u200711882; заявл. 29.10.07; опубл. 25.02.08, Бюл. № 2. – 3 с.

74. Бороненко М. П. Модель движения и нагрева частиц в плазменной струе / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, А. Е. Серегин // Вестник Югорского гос. ун-та, 2012. – Выпуск 2 (25). – С. 7–15.

75. Хрусталева Т. Р. Расчет температуры и траектории частиц в неизотермической струе газа / Т.Р. Хрусталева, С. А. Панфилов, А. И. Друговский // Физика и химия обработки материалов, 1979. № 2. – С. 70–74.

76. Oerlikon Metco [Электронный ресурс] — (Станом на 27/01/2015). — Режим доступу: <http://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/systems/arc/> — Назва з екрану.

77. Eutectic Castolin [Электронный ресурс] — (Станом на 28/01/2015). — Режим доступу: <https://www.castolin.com> — Назва з екрану.

78. Praxair Surface Technologies [Электронный ресурс] — (Станом на 29/01/2015). — Режим доступу: <http://www.praxairsurfacetechologies.com/components-materials-and-equipment/coating-equipment/thermal-spray-coating-systems> — Назва з екрану.

79. Nanosteel [Электронный ресурс] — (Станом на 29/01/2015). — Режим доступу: <https://nanosteelco.com/> — Назва з екрану.

80. ВНИИавтогенмаш [Электронный ресурс] — (Станом на 29/01/2015). — Режим доступу: <http://autogenika.ru/> — Назва з екрану.

81. НТК ІЕЗ НАН України [Электронный ресурс] — (Станом на 29/01/2015). — Режим доступу: <http://stc-paton.com/ukr/equipment/surface> — Назва з екрану.

82. Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України [Електронний ресурс] — (Станом на 30/01/2015). — Режим доступу: <http://www.ipm.lviv.ua/rozrobky.php?&id=r4> — Назва з екрану.

83. Структурные изменения в поверхностном слое газотермических покрытий при ультразвуковой обработке стальными шариками / [Ю. С. Борисов, А. Г. Ильенко, А. Л. Гайдаренко и др.] // Порошковая металлургия. 1992. — № 2. — С. 23–28.

84. Соколова Т. В. Уплотнение плазменных покрытий методом пропитки // Жаростойкие покрытия для защиты конструкционных материалов / Т. В. Соколова, С. С. Бартенев, А. В. Кийко. — Л.: Наука, 1977. — С. 161–168.

85. Скворцов В. В. Электроимпульсная обработка плазменно напыленных покрытий / В. В. Скворцов, Б. Н. Журкин, В. И. Высоцкая // Электрофиз. методы и технол. воздействия на структуру и свойства мет. матер.: Всес. шк.-семина., сент., 1990. — Л., 1990. — С. 135–136.

86. Перспективы применения потоков заряженных частиц в инженерии поверхности / [Ю. Д. Ягодкин, К. М. Пастухов, С. А. Мубояджян и др.]. // МиТОМ. — 1999. — № 7. — С. 36–41.

87. Шепетов В. В. Електроіскрове легування для підвищення триботехнічних характеристик деталей авіаційної техніки / В. В. Шепетов, А. Г. Довгаль, Л. В. Бурдушенко // Вісник НАУ. — 2004. — № 1. — С. 83–87.

88. Wang K. Microstructure and properties of laser remelted cobalt based and nickel based plasma sprayed coatings / K. Wang, J. Liu, D. Han // Surface Eng. — 1996. — 12, № 3. — P. 235 – 238.

89. Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr- based powder wires / Н. Рокхмурска, V. Dovgunyk, M. Student; [et al] // Surface and Coatings Technology. — 2002. — № 151 – 152. — P. 490 – 494.

90. Mateos J. Tribological behaviour of plasma-sprayed WC coatings WITH and without laser remelting / J. Mateos, J. M. Cuetos, E. Fernandez, R. Vijande // Wear. — 2000. — № 239. — P. 274-281.

91. Электроимпульсная обработка плазменно напыленных покрытий / Скворцов В. В., Журкин Б. Н., Высоцкая В. И. // Электрофиз. методы и технол. воздействия на структуру и свойства мет. матер.: Всес. шк.-семина., сент., 1990. – Л., 1990. – С. 135–136.

92. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э. В. Рыжов, С. А. Клименко, О. Г. Гуцаленко / НАН Украины; Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – К.: Наукова думка, 1994. – 181 с.

93. Бойцов А. Г. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А. Г. Бойцов, В. Н. Машков, В. А. Смоленцев, Л. А. Хворостухин. – М.: Машиностроение, 1991. – 144 с.

94. Спиридонов Н. В. Повышение эксплуатационных характеристик диффузионных боридных слев лазерной обработкой / Н. В. Спиридонов, О. Г. Девойко // Трение и износ. – 1986. – Т. 7, № 5. – С. 372 – 376.

95. Ботвинко В. П. Підвищення працездатності інструменту з швидкоріжучих сталей шляхом комбінованого впливу електроіскрового легування та лазерної обробки: Автореф. дис. к. т. н. – Київ, ІПМ НАН України, 1998. – 19 с.

96. Ильенко А. Г. Повышение физико-механических свойств газотермических покрытий ультразвуковой обработкой: Автореф. дис. ... к. т. н. – Киев: 1991. – 16 с.

97. Харламов Ю. О. Обробка деталей при відновленні і зміцненні: навч. посібник / Ю. О. Харламов, С. А. Клименко, М. А. Будаг'янц, Л. Г. Полонський. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2007. – 500 с.

98. Григорьянц А. Г. Основы лазерного термоупрочнения сплавов / А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов. – М.: Высшая школа – 1988. – 238 с.

99. Коваленко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Черненко В.С. – К.: Техніка, 1990. – 123 с.

100. Верхотуров А. Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров, И. М. Муха. – К.: Техніка, 1981. – 186 с.

101. Электроискровое легирование металлических поверхностей / [Самсонов Г. В, Вертоухов А. Д., Бовкун Г. А., Сычев В. С.]. – К.: Наукова думка, 1976. – 220 с.

102. Коваленко В. С. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов / В. С. Коваленко, А. Д. Верхотуров, Л. Ф. Головкин и др. – М.: Наука, 1986. – 280 с.

103. Смаглюк А. К. Временные характеристики процесса виброэлектроискрового легирования / А. К. Смаглюк // Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении. (Респ. межвед. науч.-техн. сборник). – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те. – 1984. – Вып. 23. – С. 36-38.

104. Полонский Л. Г. Механическая обработка газотермических покрытий и ее влияние на развитие техники напыления / Л. Г. Полонский // Вестник НТУ ХПИ: сб. науч. трудов. – Харьков, 2011. – С. 132–145.

105. Муковоз Ю. А. Токарная обработка деталей с износостойкими покрытиями / Ю. А. Муковоз, С. А. Клименко // Технология и организация производства, 1990. – № 1. – С. 20–21.

106. Обработка износостойких покрытий. / Под общей ред. Ж. А. Мрочка. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.

107. Клименко С. А. Основи лезової обробки зносостійких захисних покриттів: Автореф. дис.... д.т.н. /05.03.01/ – Київ: ІНМ НАНУ, 1999. – 36 с.

108. Ситников А. А. Технологические основы обеспечения точности изготовления деталей с плазменными покрытиями: Автореф. дис ... д. т. н.: 05.02.08. – Барнаул: АГТУ 2002. – 32 с.

109. Пилипенко О. М. Науково-технічні основи підвищення ефективності механічної обробки газотермічних покриттів: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.01 / ІНМ НАН України. – К., 2004. – 36 с.

110. Пилипенко О. М. Вібраційна обробка газотермічних покриттів / О. М. Пилипенко. – Черкаси: Сіяч, 2000. – 203 с.

111. Клименко С. А. Точение износостойких защитных покрытий / С. А. Клименко, Ю. А. Муковоз, Л. Г. Полонский, П. П. Мельничук. – К.: Техніка, 1997. – 144 с.

112. Пат. 100332 Україна, МПК В 23 В 1/00. Спосіб визначення припуску на механічну обробку виробів з газотермічними покриттями / М. П. Кравченко, Л. Г. Полонський, В. М. Ночвай, В.О. Лошенков, О. А. Степчин; заявник і патентовласник ЖДТУ. – № а201111957; заявл. 11.10.11; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23. – 4 с.

113. Визначення припуску на обробку виробів з газотермічним покриттям ПГ-12Н-01 товщиною 0,6 – 2,4 мм за критерієм шорсткості / [М. П. Кравченко, В. М. Ночвай, Л. Г. Полонський, А. Й. Щехорський, Ю. Е. Рыжов] // Вісник ЖДТУ. Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – Випуск 10, 2011. – С. 178 – 191.

114. Харламов Ю. А. Влияние геометрических погрешностей заготовки на неравномерность газотермических покрытий по толщине после размерной обработки / Ю. А. Харламов // Сварочное производство. – 1982. – № 7. – С. 32–33.

115. Харламов Ю. А. Методика расчета толщины покрытия / Ю. А. Харламов // Сварочное производство. – 1987. – № 9. – С. 9–11.

116. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович / Репринтное воспроизведение издания 1960 г. — М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.

117. Мартинсон Л. К., Малов Ю. И. Дифференциальные уравнения математической физики: Учеб. для вузов. 2-е изд. / Под ред. В.С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 368 с.

118. Макаров А. Н., Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания. Ч. 2. Теплообмен в факельных печах, топках, камерах сгорания: монография / А. Н. Макаров. – Тверь: ТГТУ, 2009. – 152 с.

119. Воропай Н. М. Распределение температуры в воздушной струе и напыляемой основе при электродуговой металлизации / Н. М. Воропай, О. И. Мажейка, С. И. Маркович // Автоматическая сварка, 2004. № 5. – С. 18–21.

120. Баврин И. И. Краткий курс теории вероятностей и математическая статистика / И. И. Баврин, В. Л. Матросов. — М.: Прометей, 1989. — 136 с.

121. Свойства порошков металлов, тугоплавких соединений и спечённых материалов / Под ред. И. М. Федорченко. – К. : Наукова думка, 1978. – 184 с.

122. Самсонов Г.В. Карбиды вольфрама / Г. В. Самсонов, В. К. Витрянюк, Ф. И. Чаплыгин. – К.: Наукова думка, 1974. – 175 с.

123. Харламов Ю. А. Влияние микрорельефа поверхности на прочность сцепления с газотермическими покрытиями / Ю. А. Харламов, Б. С. Борисов // Автоматическая сварка. – 2001. – № 6. – С. 19 – 26.

124. Яременко О. В. Испытания насосов: справочн. пособие / О. В. Яременко. – М.: Машиностроение, 1976. – 225 с.

125. Саакян Л. С. Влияние нагружения на микроэлектрохимическую гетерогенность стали / Л. С. Саакян, А. П. Ефремов, Л. Я. Ропяк // Защита металлов. – 1989. – Т. 25. – № 2. – С. 233-237.

126. Бабей Ю. I. Метод определения остаточных напряжений первого рода / Ю. I. Бабей, М. Ф. Бережницкая. – Львов, 1980.– 66 с.– (Препринт / Физ.-мех. ин-т АН УССР, № 30).

127. Пляскин И. И. Оптимизация технических решений в машиностроении / И. И. Пляскин. – М.: Машиностроение, 1982. – 176 с. 128Внуков Ю. Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю. Н. Внуков, А. А.Марков, Л. В. Лаврова, Н.Ю. Бердышев: Под общ. ред. Ю. Н. Внукова. – Киев: Техніка, 1992. – 143 с.

129. Кристенсен Р. М. Введение в механику композитов / Р. М. Кристенсен. – М.: Мир, 1982. – 334 с.

130. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю. Г. Шнейдер. – Л.: Машиностроение, 1972. – 210 с.

131. Гурей І. В. Технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей виробів параметрами імпульсної фрикційної обробки: Дис. д-ра техн. наук: 05.02.08 / Гурей Ігор Володимирович. Тернопільський держ. технічний ун-т ім. Івана Пулюя. — Тернопіль., 2002. — 429 арк. — Бібліогр.: арк. 369 – 400.

132. Краснов В. И. Ремонт центробежных и поршневых насосов нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий / В. И. Краснов. – М.: Химия, 1996. – 321 с.

133. Тушинский Л. И. Исследования структуры и физико-механических свойств покрытий. – Новосибирск : Наука, 1986. – 200 с.

134. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1986. – Т 2. – 656 с.

135. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

136. Основы технологии машиностроения: [учебник для вузов / Под ред. В. С. Корсакова. – 3-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1977. – 416 с.

137. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1986. – Т 1. – 656 с.

138. Тарзиманов Г. А. Проектирование металлорежущих станков / Г. А. Тарзиманов. – М. : Машиностроение, 1972. – 312 с.

139. Обработки металлов резанием: справочник технолога / [А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др.]; под общ. ред. А. А. Панова. – М. : Машиностроение. – 1988. – 736 с.

140. Макаров А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов / А. Д. Макаров – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.

141. Комисаров В. И. Размерная наладка универсальных станков / В. И. Комисаров, В. И. Леонтьев, В. Г. Старостин. – М. : Машиностроение, 1968. – 206 с.

142. Сулима А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

143. Суслов А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

144. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В. А. Барвинок – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.

145. Величкович А. С. Оцінка міцності вкритої шаруватим покриттям ділянки штока бурового насоса з урахуванням позаштатних напружень / А. С. Величкович, Л. Я. Роп'як // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2013. – № 772. – С. 182–191.

146. Крагельский И. В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. в 2-х кн. / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400 с.

147. ГОСТ 4543-71 Замки для бурильных труб. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 24 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Авторські свідоцтва на винаходи та патенти

Додаток А1

СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 788503

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР,
Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий
выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:
"Установка для напыления комбинированных покрытий
электродуговым методом"

Автор (авторы): Шуленок Павел Федорович и Кустов Виктор
Владимирович

Заявитель: ИВАНО-ФРАНКОВСКИЙ ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА

Заявка № 2788539 Приоритет изобретения 25 июня 1979г.
Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений СССР

14 августа 1980г.
Действие авторского свидетельства распро-
страняется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела

МПФ Гознака. 1979. Зак. 79-3083.





Додаток А4



УКРАЇНА

(19) (UA)

(11) 39303 А

(51) 7 G01N27/30

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

Деклараційний патент на винахід

зареєстровано відповідно до Закону України
"Про охорону прав на винаходи і корисні моделі" від 15 грудня 1993 року № 3687-XII
у редакції від 1 червня 2000 року № 1771-III

Голова Департаменту



(21) 2000010334
(22) 20.01.2000
(24) 15.06.2001
(46) 15.06.2001. Бюл. № 5

(72) Роп"як Любомир Ярославович, Петрина Дмитро Юрійович, Шуляр Ірина
Орестівна, Кустов Віктор Володимирович, Гусак Володимир Миколайович
(73) Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

(54) МІКРОЕЛЕКТРОД ДЛЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

УКРАЇНА

Додаток А5



УКРАЇНА

(11) **40784**

(19) (UA)

(51) 7 C23C4/04,
26/02,
28/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ**ПАТЕНТ
на винахід**видано відповідно до Закону України
"Про охорону прав на винаходи і корисні моделі"Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

М. Паладій

(21) 2000010333
 (22) 20.01.2000
 (24) 15.12.2003
 (46) 15.12.2003. Бюл.№ 12

(72) Кустов Віктор Володимирович, Роп"як Любомир Ярославович
 (73) Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

**(54) УСТАНОВКА ДЛЯ НАПИЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ
ЕЛЕКТРОДУГОВИМ МЕТОДОМ**

Додаток А6



Додаток А7



УКРАЇНА
Міністерство освіти і науки України
Державний департамент інтелектуальної власності

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір
№ 39064

Комп'ютерна програма "Програма підбору чисел зубів змінних зубчастих коліс гітар" ("Gitara Zmin Zub Kohis 001 KIS")
(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Роп'як Віра Ярославівна, Когут Ігор Сергійович, Роп'як Любомир Ярославович, Кустов Віктор Володимирович**
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Роп'як Віра Ярославівна, вул. Фельковича, 7, кв. 45, м. Івано-Франківськ, 76008; Когут Ігор Сергійович, с. Лючки, Косівський р-н, Івано-Франківська обл., 78612; Роп'як Любомир Ярославович, вул. Фельковича, 7, кв. 45, м. Івано-Франківськ, 76008; Кустов Віктор Володимирович, вул. Гната Хоткевича, 52/1, кв. 40, м. Івано-Франківськ, 76022; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019**
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації **07.07.2011**

Голова Державного департаменту інтелектуальної власності  **М.В.Паладій**



Додаток Б

Застосування регресійного аналізу для дослідження шорсткості обробленої поверхні покриттів

У ході регресійного аналізу зазвичай потрібно виконати три послідовні етапи дослідження:

1) визначити тип функції f (вибір структури моделі) для опису шуканої залежності

$$y_i = f(X_i, \alpha) + \varepsilon_i, \quad (\text{Б1})$$

де y_i – залежна змінна, $X_i = (x_{1,i}, \dots, x_{k,i})$ – значення незалежних змінних, для i -го спостереження, $\alpha = (\alpha_0, \dots, \alpha_m)$ – вектор невідомих параметрів моделі, що підлягають оцінці, $\varepsilon_i = y_i - \tilde{y}_i$ – відхилення між експериментальними та теоретичними даними;

2) здійснити розрахунок невідомих коефіцієнтів рівняння регресії $\alpha_0, \dots, \alpha_m$;

3) отримати оцінку адекватності отриманої моделі.

У теперішніх умовах усі ці три процедури можна виконувати комплексно. Сучасні пакети прикладних програм дозволяють одночасно побудувати декілька видів рівнянь, отримати оцінки їх параметрів, а потім, користуючись відповідними критеріями, підібрати кращу модель. В якості таких критеріїв можуть бути використані: максимальне значення коефіцієнта детермінації, максимальне значення F-критерію Фішера, мінімальне значення залишкової дисперсії, мінімальне значення стандартної помилки рівняння, нормальність розподілу залишкового ряду похибок ε_i та інші.

Визначення типу функції регресії (1), яка б кращим чином апроксимувала поле кореляції, здійснюють методом підбору. Враховуючи природу показників, що вивчаються, вигляд кореляційного поля та властивості математичних функцій для побудови апроксимаційної лінії вибрано степеневі поліноми. За наявності одного незалежного параметра x – товщини знятого шару різанням (припуску), та позначивши шорсткість обробленої поверхні $R_a = y$, отримаємо

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \dots + \alpha_m x^m. \quad (\text{Б2})$$

Степінь m полінома (2.2) підбирали з умови максимального значення коефіцієнта детермінації (відношення дисперсії умовного математичного сподівання до загальної дисперсії)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (\text{Б3})$$

та мінімального значення залишкової дисперсії

$$\sigma_{\text{зал}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2}{n - m - 1}. \quad (\text{Б4})$$

Тут y_i , \tilde{y}_i – експериментальні та теоретичні значення шорсткості відповідно, \bar{y} – математичне сподівання залежної змінної. Коефіцієнт детермінації регресії (3) змінюється в межах $0 \leq R^2 \leq 1$ і наближається до одиниці, якщо досліджувані величини пов'язані функціональним зв'язком ($y_i = \tilde{y}_i$), або – до нуля, якщо вхідна і вихідна величини є незалежними.

Загалом збільшення степеня m апроксимаційного полінома зазвичай призводить до більш точного наближення трендової лінії до експериментальних даних, однак разом із тим при застосуванні моделей вищих порядків зростатиме вплив випадкових похибок результатів експерименту. Також при виконанні операцій піднесення в степінь при розрахунках за формулами високих порядків, похибки округлення стають настільки великими, що можуть зводити нанівець вигоду від підвищення порядку регресії.

Найбільш прийнятні результати отримують при апроксимації результатів вимірювання параметра шорсткості обробленої поверхні поліномами третього (напилене композиційне покриття) та п'ятого степенів (напилене покриття) відповідно до меншої та більшої кількості експериментальних точок вимірювань $n = 8 \dots 10$ та $n = 25$.

Статистичні оцінки параметрів $\alpha_0, \dots, \alpha_m$ апроксимуючих залежностей отримують методом найменших квадратів. Оцінку значущості отриманих коефіцієнтів виконують на основі t -критерію, виходячи з довірчої ймовірності 95 % і числа ступенів вільності $p - k - 1$, де p – число спостережень, k – кількість параметрів у рівнянні регресії. Також перевіряють адекватність апроксимуючої залежності в цілому за критерієм Фішера. Розрахункові значення критеріїв та статистичних оцінок регресійних рівнянь здійснюють у програмному середовищі STATISTICA.

Матриця планування експерименту 2^4

| Дослід | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | y | y_n |
|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 1 | + | + | + | + | 1,61 | 1,2 |
| 2 | - | + | + | - | 3,09 | 2,38 |
| 3 | + | + | - | + | 2,19 | 1,5 |
| 4 | + | + | - | - | 2,63 | 2,04 |
| 5 | + | - | + | + | 1,91 | 1,58 |
| 6 | + | - | + | - | 2,35 | 2,12 |
| 7 | + | - | - | + | 2,49 | 1,88 |
| 8 | + | - | - | - | 2,93 | 2,42 |
| 9 | - | + | + | + | 2,65 | 2,04 |
| 10 | - | + | + | - | 3,09 | 2,58 |
| 11 | - | + | - | + | 3,23 | 2,34 |
| 12 | - | + | - | - | 3,67 | 2,88 |
| 13 | - | - | + | + | 2,95 | 2,42 |
| 14 | - | - | + | - | 3,39 | 2,96 |
| 15 | - | - | - | + | 3,53 | 2,72 |
| 16 | - | - | - | - | 3,97 | 3,26 |

Додаток В

Розрахунок складових загальної похибки обробки

Похибка миттєвого розсіювання розміру

$$\Delta_{\text{м.н.}} = 1,2\sqrt{\Delta_{\text{н}}^2 + \Delta_{\text{y}}^2} + \Delta_{\text{в}}, \quad (\text{В.1})$$

де $\Delta_{\text{н}}$ – похибка настроювання, мм; Δ_{y} – похибка, що залежить від зміни величини деформації системи ВПД, мм;

$\Delta_{\text{в}}$ – похибка форми від геометричної неточності верстата в радіальному напрямку, мм.

Похибка настроювання $\Delta_{\text{н}}$ системи ВПД на отримання виконавчого розміру обробленої поверхні розраховується за виразом:

$$\Delta_{\text{н}} = 1,2\sqrt{\Delta_{\text{рег}}^2 + \Delta_{\text{вим}}^2 + \Delta_{\text{зміщ}}^2}. \quad (\text{В.2})$$

де $\Delta_{\text{рег}}$ – похибка регулювання положення різця, мм;

$\Delta_{\text{вим}}$ – похибка вимірювання, мм;

$\Delta_{\text{зміщ}}$ – похибка зміщення центру групування відносно розміру налагодження, мм.

Похибку регулювання визначаємо враховуючи, що обробка виконується на токарному верстаті з числовим програми керуванням, з дискретністю системи ЧПК 0,005 мм.

Похибка вимірювання для мікрометра МК 50-75 складає $\Delta_{\text{вим}} = 0,012$ мм.

Похибку зміщення центру групування орієнтовно можна визначити із виразу [136]:

$$\Delta_{\text{зміщ}} = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{m}}, \quad (\text{В.3})$$

де σ – середнє квадратичне відхилення, що характеризує точність даного методу обробки, мм;

m – кількість пробних деталей.

Наближено приймаємо

$$\sigma = \frac{\delta}{6}, \quad (\text{B.4})$$

де δ – допуск на розмір, що витримується, мм;

Отже, із врахуванням вказаного ($\delta = 0,19$ мм), маємо:

$$\sigma = \frac{0,19}{6} = 0,032 \text{ мм.}$$

Тоді $\Delta_{зміщ}$ буде дорівнювати ($m = 4$):

$$\Delta_{зміщ} = \frac{0,032}{\sqrt{4}} = 0,016 \text{ мм.}$$

Таким чином, похибка настроювання для обох видів оброблюваних зразків втулок становить:

$$\Delta_H = 1,2 \sqrt{0,005^2 + 0,012^2 + 0,016^2} = 0,025 \text{ мм}$$

З розрахунку на радіус похибка настроювання дорівнює:

$$\Delta_{H_R} = \frac{\Delta_H}{2} = 0,0125 \text{ мм.}$$

Похибка установки $\varepsilon = 0$.

Похибку Δ_y від зміни величини деформації технологічної системи, спричинену зміною глибини різання, встановлювали для зразків із суцільного матеріалу за виразом, користуючись довідковими даними [134, 137]

$$\Delta_y = C_{Py} \cdot S^{y_{Py}} \cdot V^{n_{Py}} \cdot K_p \left(t_{max}^{x_{Py}} - t_{min}^{x_{Py}} \right) \cdot \omega, \quad (\text{B.5})$$

де V – швидкість різання, м/хв.;

S – подача, мм/об;

t_{max} , t_{min} – максимальна і мінімальна глибини різання, мм;

C_{Py} , x_{Py} , y_{Py} , n_{Py} – коефіцієнт та показники степенів для розрахунку нормальної складової сили різання P_y , відповідно;

ω – піддатливість верстата, мкм/м.

Цю величину приймаємо постійною, оскільки довжина деталі незначна. Піддатливістю деталі нехтуємо. Величину сили різання при проведенні аналізу

точності обробки при точінні зразків із суцільного матеріалу та з напиленим покриттям також визначали експериментально (розділ 3). Розходження експериментальних даних з теоретичними не перевищувала 7 і 10 % відповідно.

Таким чином, згідно з формулою (5) Δ_y дорівнює:

$$\Delta_y = 10 \cdot 243 \cdot 0,15^{0,6} \cdot 120^{-0,3} \times 0,85 \cdot (0,5^{0,9} - 0,4^{0,9}) \cdot 0,0365 \cong 0,001 \text{ мм.}$$

Для визначення похибки Δ_y для зразків з напиленим покриттям застосуємо формулу, яка включає в себе показник твердості оброблюваної поверхні, оскільки відомо, що твердість покриття за рахунок наявності в його складі твердих частинок оксидів, нітридів, що утворюються в процесі напилювання, значно зростає у порівнянні із твердістю вихідного матеріалу для напилення. Вказаний фактор враховується в нижченаведеній залежності [134, 138]:

$$\Delta_y = C_{Py} \cdot S^{Py} (t_{max}^{x_{Py}} - t_{min}^{x_{Py}}) \cdot HB^{n_{Py}} \cdot \omega, \quad (B.6)$$

де HB – твердість покриття за Брінелем, HB 230.

Підставивши значення параметрів у вираз (6) отримаємо

$$\Delta_y = 0,0027 \cdot 0,25^{0,75} (0,5^{0,9} - 0,4^{0,9}) 230^2 \cdot 0,0365 \cong 0,0005 \text{ мм.}$$

Похибка форми деталі у радіальному напрямку Δ_g обумовлена геометричною неточністю верстата. Вона належить до постійних систематичних похибок і містить в собі складову Δ'_g , зумовлену радіальним чи осьовим биттям шпинделя, і складову Δ''_g , зумовлену відхиленнями паралельності осі шпинделя до напрямних станини токарного верстата в горизонтальному напрямку.

Згідно з [139] отримаємо відповідно:

$$\Delta'_g = 0,008 \text{ мм, } \Delta''_g = 0,02 \text{ мм.}$$

Таким чином,

$$\Delta_g = \Delta'_g + \Delta''_g = 0,008 + 0,02 = 0,028 \text{ мм.}$$

Відхилення форми втулки на радіус

$$\Delta_{e_R} = \frac{\Delta_e}{2} = \frac{0,028}{2} = 0,014 \text{ мм.}$$

Отже, похибка миттєвого розсіювання в розрахунку на радіус $\Delta_{M.H.R}$ та на діаметр $\Delta_{M.H.}$ дорівнює відповідно:

– для зразків з суцільного матеріалу:

$$\Delta_{M.H.R} = 1,2\sqrt{(0,001)^2 + (0,0125)^2} + 0,014 = 0,0325 \text{ мм;}$$

$$\Delta_{M.H.} = 2\Delta_{M.H.R} = 0,065 \text{ мм;}$$

– для зразків з напиленим покриттям

$$\Delta_{M.H.R} = 1,2\sqrt{(0,0005)^2 + (0,0125)^2} + 0,014 = 0,0325 \text{ мм;}$$

$$\Delta_{M.H.} = 2\Delta_{M.H.R} = 0,065 \text{ мм.}$$

Визначаємо систематичну похибку обробки $\Delta_{сист}$, яка є закономірно змінною і викликана сумарною дією розмірного спрацювання різця Δ_i та його температурною деформацією Δ_T .

Розмірне зношування різця визначали за формулою [137, 140]:

$$\Delta_i = U_o \left(1 + \frac{V \cdot \tau}{1000} \right), \quad (B.7)$$

де U_o – відносне зношування різця, мкм/км;

$U_o = 6$ мкм/км – для зразків з суцільного матеріалу;

$U_o = 9$ мкм/км – для зразків з покриттям;

V – швидкість різання, м/хв;

τ – час обробки, хв.

Запишемо розрахункову залежність Δ_i для зразків з суцільного матеріалу, підставивши в (B.7) значення U_o

$$\Delta_i = 6 \left(1 + \frac{120 \cdot \tau}{1000} \right) = 6(1 + 0,12\tau). \quad (B.8)$$

Аналогічно для зразків з покриттям Δ_{i_n} буде дорівнювати

$$\Delta_i = 9 \left(1 + \frac{22 \cdot \tau}{1000} \right) = 9(1 + 0,022\tau). \quad (\text{B.9})$$

Похибку від температурної або теплової деформації різця визначаємо за виразом [137, 141]:

$$\Delta T = C \frac{L_p}{F} \sigma_\epsilon (t - S)^{0,75} \cdot V^{0,5} \frac{T_o}{T_o + T_{пер}} \left(1 - e^{-\frac{4\tau}{\tau_m}} \right), \quad (\text{B.10})$$

де C – константа;

L_p – виліт різця, мм;

F – площа поперечного перерізу державки різця, мм²;

σ_ϵ – границя міцності обробленого матеріалу, кг/мм²;

t, S, V – глибина різання, подача, швидкість різання відповідно;

T_o – основний час обробки, хв;

$T_{пер}$ – перерва між обробкою кожної деталі, хв;

τ_m – константа, що змінюється в межах 12...24 хв.

Приймаємо $\tau_m = 16$ хв.

Зразки з напиленням покриттям, як зазначено вище, мають підвищену твердість, тому доцільно для врахування цієї особливості визначити σ_ϵ , керуючись відомою залежністю для сталей, що $\sigma_\epsilon \approx 0,35 \text{ НВ}$ [29]. Таким чином, в даних розрахунках приймаємо величину σ_ϵ покриття рівною

$$\sigma_\epsilon = 0,35 \cdot 230 \approx 81 \text{ кг/мм}^2.$$

Спростивши вираз (B.10) і підставивши в нього числові значення складових величин, отримали кінцеві формули для визначення похибки від теплової деформації різця ΔT при точінні суцільних зразків і зразків із покриттям відповідно:

$$\Delta T = 4,5 \frac{20}{400} 60(0,5 \cdot 0,5)^{0,75} \cdot 120^{0,5} \times \frac{1,4}{1,4 + 0,5} \left(1 - e^{-\frac{4\tau}{16}} \right) = 15,6 \left(1 - e^{-\frac{4\tau}{16}} \right), \quad (\text{B.11})$$

$$\Delta T = 4,5 \frac{20}{400} 81(0,5 \cdot 0,25)^{0,75} \cdot 22^{0,5} \times \frac{4,2}{4,2 + 0,5} \left(1 - e^{-\frac{4\tau}{16}} \right) = 16,4 \left(1 - e^{-\frac{4\tau}{16}} \right). \quad (\text{B.12})$$

Визначаємо окремі складові загальної похибки обробки при точінні циліндричних поверхонь зразків із суцільного матеріалу та зразків із напиленим покриттям, оцінюючи їх вплив на точність радіальних (діаметральних) розмірів.

Проміжні та кінцеві результати розрахунків систематичної похибки при токарній обробці зразків із суцільного матеріалу та із покриттям зведено до табл. 4.3

Таблиця В.1

Результати розрахунку систематичної похибки при обробці втулки

| τ , ХВ | 0 | 2 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
|---|-------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Втулка з суцільного матеріалу | | | | | | | | | | | |
| Δi , МКМ | 6 | 7,5 | 9 | 12 | 15 | 18 | 20 | 35 | 49 | 64 | 78 | 92 |
| ΔT , МКМ | 0 | 6 | 10 | 13,5 | 15 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 |
| $\Delta_{\text{сист}} = 2(\Delta i + (-\Delta T))$, МКМ | 12 | 11 | 13 | 18 | 23 | 28 | 32 | 62 | 90 | 120 | 148 | 176 |
| | Втулка з напиленим покриттям | | | | | | | | | | | |
| Δi , МКМ | 9 | 9,5 | 10,5 | 11 | 11,5 | 12 | 13 | 18 | 21 | 25 | 29 | 33 |
| ΔT , МКМ | 0 | 6,5 | 0,5 | 14 | 15,5 | 16 | 16,5 | 16,5 | 16,5 | 16,5 | 16,5 | 16,5 |
| $\Delta_{\text{сист}} = 2(\Delta i + (-\Delta T))$, МКМ | 18 | 6 | 0 | -6 | -8 | -8 | -7 | +3 | 9 | 7 | 25 | 33 |

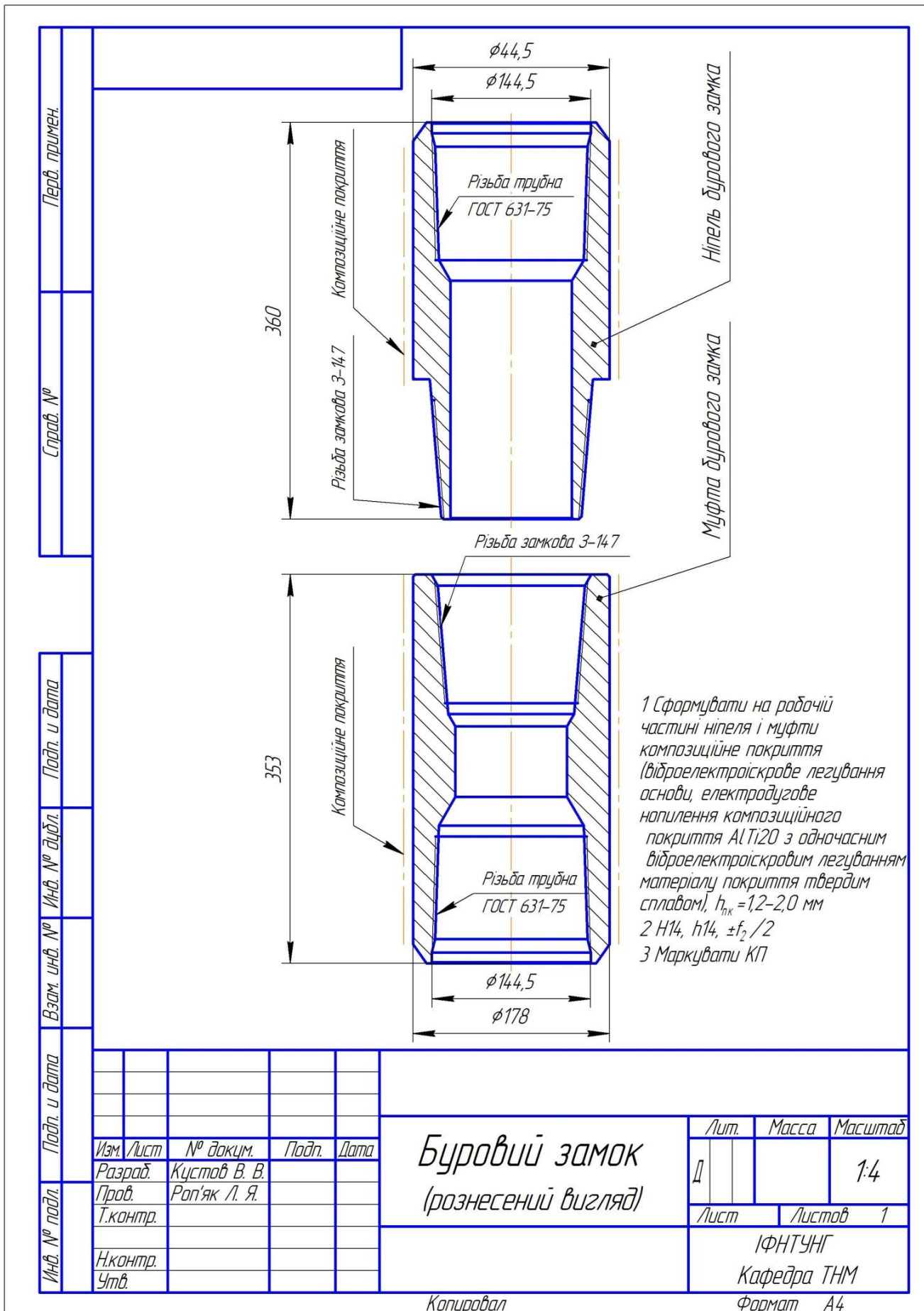
Додаток Г

Креслення деталей та оправок

| | | | | |
|---------------|--|--|--|--|
| Перв. примен. | | | | |
| Справ. № | | | | |
| Подп. и дата | | | | |
| Инв. № дубл. | | | | |
| Взам. инв. № | | | | |
| Подп. и дата | | | | |
| Инв. № подл. | | | | |

1 Сформувати на робочій поверхні втулки композиційне покриття (відраелектроіскрове легування основи молібденом, електродугове напилення робочого композиційного шару з матеріалу сталевих дротів та уведення в розпилюючий потік частинок WC або TiC, верхнього технологічного шару із сталевих дротів який підлягає механічній обробці, відраелектроіскрове легуванням твердим сплавом обробленої поверхні покриття), $h_{нк} = 0,6-1,8$ мм
 2 Н14, h14, $\pm f_2/2$
 3 Маркувати КП

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------|--------------|----------|-------|------|-----------------|--|--|--|--|------------------------|--------|---------|-----|
| | | | | | | | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | Втулка защитная | | | | | Лит. | Масса | Масштаб | |
| Разраб. | Кустов В. В. | | | | | | | | | Д | | | 1:1 |
| Пров. | Роп'як Л. Я. | | | | | | | | | Лист | Листов | | 1 |
| Т.контр. | | | | | | | | | | ІФНТУНГ Кафедра ТНМ | | | |
| Н.контр. | | | | | Формат А4 | | | | | | | | |
| Утв. | | | | | Копировав | | | | | | | | |



Справ. № _____
Перв. примен.

Взам. инв. № _____
Инв. № дубл. _____
Подп. и дата _____

Инд. № подл. _____
Подп. и дата _____

| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
|----------|------|--------------|-------|------|
| Разраб. | | Кустов В. В. | | |
| Пров. | | Рап'як Л. Я. | | |
| Т.контр. | | | | |
| Н.контр. | | | | |
| Утв. | | | | |

Буровий замок
(рознесений вигляд)

| Лит. | Масса | Масштаб |
|------|--------|---------|
| Д | | 1:4 |
| Лист | Листов | 1 |

ІФНТУНГ
Кафедра ТНМ

Копировав

Формат А4

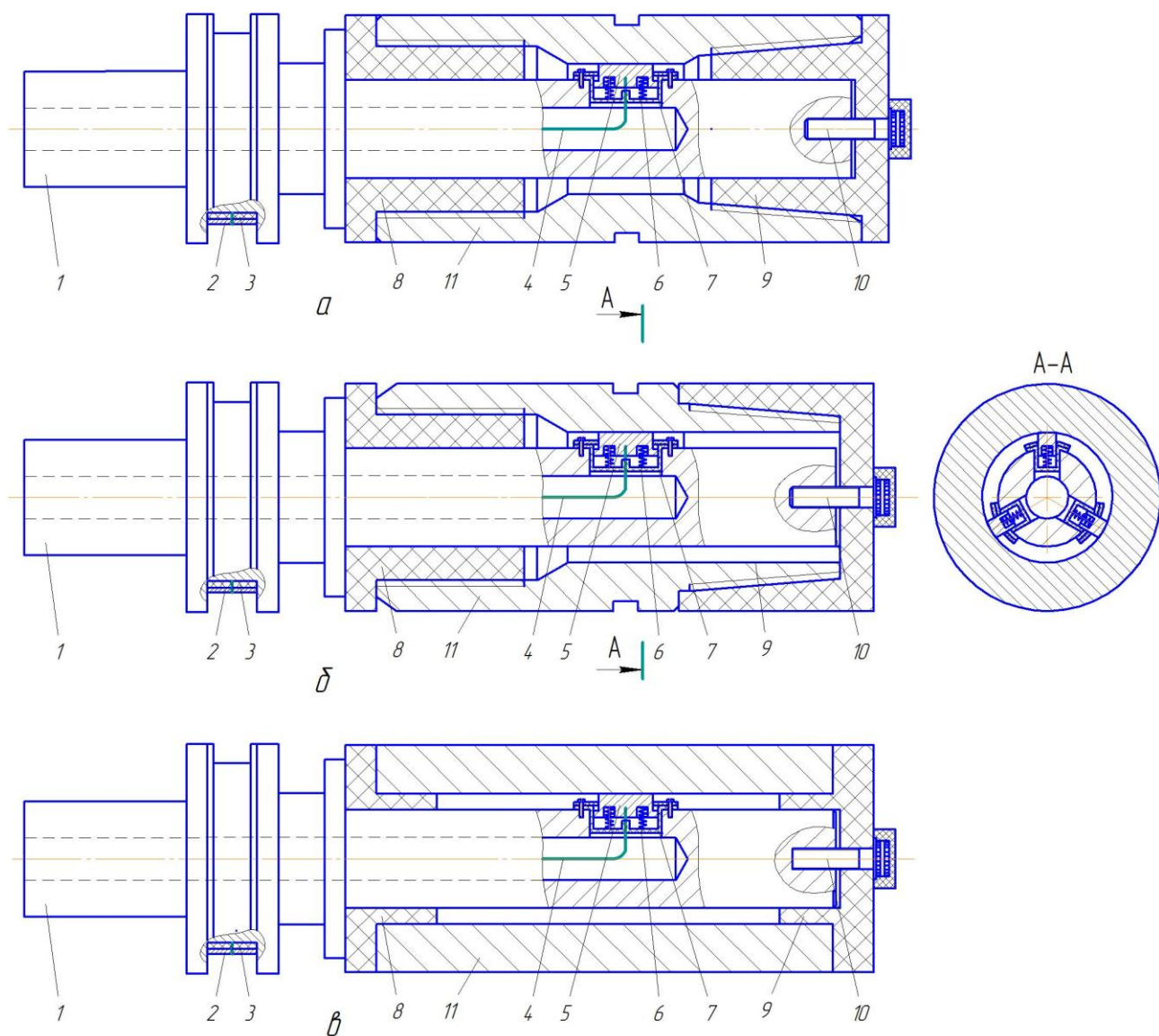


Рис. Г.1. Універсальні оправки для встановлення муфти (а), ніпеля бурильного замка (б) та втулки захисної вала відцентрового насоса (в):

1 – оправка; 2 – кільце мідне; 3 – електроізолююче кільце; 4 – мідний провідник; 5 – контакт; 6 – пружина; 7 – вставка електроізолююча; 8 – втулка електроізолююча; 9 – кришка центруюча електроізолююча; 10 – гвинт спеціальний; 11 – муфта, ніпель або втулка захисна вала відповідно.

Додаток Д

Аналіз шкідливих чинників при нанесенні покриттів [1].

В роботі проведено аналіз шкідливих чинників, що впливають як на людей, так і на оточуюче середовище, для різних методів газотермічного напилення (ГТН) і застосовано його результати для порівняльної характеристики розробленого нами нового, ще маловивченого різновиду напилення – порошкової електродугової металізації. При цьому з аналізу виключено спільні для всіх процесів ГТН небезпеки, що виникають під час підготовки поверхні перед нанесенням покриттів.

Виникнення шкідливих чинників і небезпек може бути пов'язане, як з технологією нанесення покриттів, при якій утворюються випаровування металів, гази, металевий порошок, небезпечне випромінювання, високий рівень шуму, так і з особливостями конструкції обладнання, що входить до складу установок, для ГТН; а саме – посудини, що працюють під тиском, балони з вибухонебезпечними газами і пристрої, що знаходяться під електричною напругою.

Найбільш несприятливими з цієї точки зору можна вважати установки для плазмового напилення, які широко розповсюджені в промисловості.

До небезпечних чинників в них належать токсичні гази, високий рівень шуму, високодисперсні аерозолі металів, світлове, ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання [60]. Вони негативно впливають на обслуговуючий персонал і потребують використання захисних засобів. Крім того, вимагаються спеціальні заходи, необхідні для безпечної експлуатації балонів з плазмоутворюючими газами, а також заходи по забезпеченню водою, яка використовується для охолодження плазмотрона.

Менш інтенсивно перелічені шкідливі чинники діють при роботі газополумєневих установок (зокрема шум, випромінювання), однак вони вимагають особливої уваги при використанні ацетилену та інших горючих газів. Крім того, при високих концентраціях горючих газів в повітрі виробничих приміщень поряд з вибухонебезпечністю виявляється і наркотична їх дія на організм людини [45].

Останнє характерне і для детонаційних установок. Недоліком детонаційного напилення є і дуже високий рівень шуму, порядку 140 ДБ, що вимагає розміщення установки в спеціальній звукоізольованій камері і застосування дистанційного керування.

При розгляді шкідливих чинників найменш розповсюдженого високочастотного напилення, слід звернути увагу на несприятливу дію на оператора вихрових струмів, які розтоплюють матеріал дроту, що розпилюється. Також виникають проблеми, зв'язані з використанням води для охолодження таких установок.

Переходячи до аналізу шкідливих чинників, що виникають при роботі установки для порошкової електродугової металізації, необхідно відмітити їх спільність із звичайною електродуговою металізацією, а саме: достатньо високий рівень шуму, який перевищує допустимі норми (хоча шум менший за величиною, ніж при плазмовому або детонаційному напиленні); наявність аерозолів металів; токсичних газів. Вплив останніх чинників може підсилюватися наявністю в дуговому розряді металізаційного апарату матеріалу порошків, що розпилюються одночасно з металом дротів-електродів. В цілому ж, інтенсивність дії цих шкідливих чинників на людину менша ніж при плазмовому напиленні. Для цього способу напилення також характерний нижчий рівень ультрафіолетового випромінювання і незначна дія інфрачервоного світла [50]. До переваг конструкції установки для порошкової електродугової металізації слід віднести відсутність балонів із стисненими вибухонебезпечними газами, шкідливих робочих рідин і водяної системи охолодження. Це зменшує загальну кількість шкідливих чинників при використанні методу порошкової електродугової металізації та робить його більш привабливим з екологічної точки зору серед інших способів ГТН.

На підставі проведеного аналізу шкідливих чинників нами були розроблені заходи щодо запобігання їх негативної дії на дільниці для порошкової електродугової металізації.

Для захисту оператора від металевих аерозолів та газових випаровувань, і щоб їх рівень не перевищував гранично допустимих концентрацій в робочому

просторі, слід збільшити продуктивність витяжної вентиляції. Це забезпечується, згідно рекомендацій [60], шляхом збільшення швидкості всмоктування повітря з 1 м/с, яка використовується при звичайній електродуговій металізації до її величини не менше 1,5 м/с. При напиленні довгомірних деталей крім нього, доцільно також застосовувати ще місцеву витяжну вентиляцію. Приймач повітря, виконаний у вигляді лійки, розміщують за деталлю, що напилюється. Цю лійку встановлюють на супорті токарного верстата і за допомогою гнучкого повітропроводу з'єднують з магістральним повітропроводом. Відомо, що швидкість входження повітря в лійку складає 8-10 м/с. Розроблену нами установку споряджено вентилятором і циклоном для очищення повітря. При розпиленні такого матеріалу, як алюміній, проходить досить сильне озонування повітря. Висока концентрація озону викликає ураження дихальної системи, а також сприяє, утворенню шкідливого для легень діоксиду азоту. Тому, з метою запобігання цим процесам, запропоновано застосувати приточно-витяжну вентиляцію, виробничого приміщення. При напиленні покриттів з цинку, міді, кадмію та інших металів і матеріалів, що утворюють шкідливі сполуки, рекомендується застосовувати спеціальні шоломи з подачею в них повітря для дихання оператора.

З метою зниження рівня шуму рекомендується металізаційну установку споряджувати закритою кабіною, яку футерують вогнестійким звукопоглинаючим матеріалом, а для захисту очей від випромінювань електричної дуги на розпилюючій головці металізатора необхідно розміщувати захисний екран. Крім того, оператору потрібно використовувати індивідуальні засоби захисту: навушники (антифони) та захисні щитки, маски зі світлофільтрами Е-200, Е-300, Е-400.

Таким чином розроблена нами установка для порошкової електродугового напилення композиційних покриттів характеризується меншим числом шкідливих чинників порівняно з іншими типами установок для ГТН.

Додаток Е

Застосування легованих гранул карбіду вольфраму для об'ємного армування породоруйнівних елементів бурових доліт

Леговані нікелем гранули твердого сплаву застосовували для об'ємного відцентрового армування виливок з однією вертикальною (А. с. № 1491609) та з двома взаємно перпендикулярними вертикальною і горизонтальною осями обертання керамічної форми (А. с. № 1197249), а також для поверхневого армування (наплавлення) робочих поверхонь зубців бурових доліт за різними схемами [8].

Виливки з однією вертикальною віссю обертання керамічної форми армували легованими нікелем гранулами з карбіду вольфраму на розробленій нами установці (Рис. Е.1.).

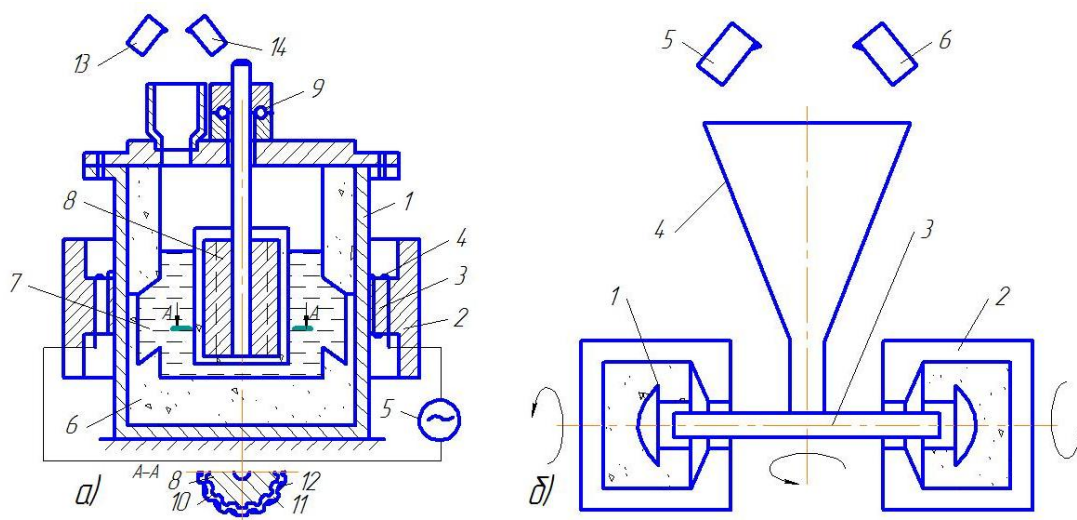


Рис. Е.1 Схеми установок для відцентрового армування заготовок деталей з вертикальною віссю обертання (а) [12] і двома взаємно перпендикулярними осями обертання керамічної ливарної форми (б) [11].

Установка складається з циліндричної обойми 1, на поверхні якої встановлений магнітопровід 2 з радіально розташованими полюсами 3, які споряджені обмотками 4, підключеними до регульованого джерела високочастотної напруги 5. Всередині обойми 1 розташована ливарна керамічна форма 6 для виготовлення відцентрово армованих виливок 7 заданої конфігурації і магнітопровід 8 у вигляді ротора, встановленого на підшипниковій опорі 9, з виступами 10 і керамічним облицюванням 11, що має на поверхні гвинтові канавки 12. Тиглі 13 і 14 служать для заливання

розтопленого металу і подачі гранул твердого сплаву відповідно в порожнину ливарної керамічної форми 6.

Установка працює таким чином. Після складання комплектуючих деталей всередині та навколо обойми 1 від регульованого джерела високочастотної напруги 5 подають живлення (змінну напругу) на обмотки 4. Магнітопровід 2 з полюсами 3 створює обертаючий індукційний момент всередині форми 6 і приводить в обертання як ротор 8, так і рідкий метал і леговані нікелем гранули карбиду вольфраму 7. Наявність виступів 10 на поверхні ротора 8 дає можливість збільшити число обертів ротора і цим самим – величину відцентрових сил, які діють на гранули реліту та розтоплений метал. Гвинтові канавки 12 керамічного облицювання 11 сприяють передачі твердосплавним армуючим гранулам імпульсів, що діють знизу вгору і не дають можливості осадження цих гранул в нижній частині керамічної форми 6. Одночасно в рідкому металі збуджуються вихрові струми, що збільшують час кристалізації рідкого металу. Під впливом відцентрових сил армуючі гранули з твердого сплаву, що вводяться в склад рідкого металу, питома вага і температура плавлення яких відповідно більші, ніж питома вага і температура плавлення матричного матеріалу (сталі), переміщуються на периферію ливарної керамічної форми 6, утворюючи об'ємно армований породоруйнівний диск бурового долота з високою зносостійкістю зовнішнього обода. Після кристалізації виливки процес індукційного обертання зупиняють і вилівок залишається на тверднення. Коли пройде повне застигання ливарної керамічної форми 6 з армованим виливком 7, їх виймають з обойми 1 і очищають від формувальної суміші.

Виливки, армовані легованими нікелем гранулами WC, одержували також відцентровим литвом при обертанні ливарної керамічної форми навколо двох взаємно перпендикулярних осей на розробленій нами установці [11] (Рис. Е.1.).

Найбільший позитивний результат досягається при об'ємному армуванні породоруйнівних елементів шарошок бурових доліт, та армуванні деталей кнопкового типу.

Установка містить керамічні ливарні форми 1, що обертаються навколо двох взаємно перпендикулярних осей; форма для отримання виливків

кнопкового типу встановлена в патроні 2, що забезпечує її обертання навколо горизонтальної осі. Для подачі рідкого металу і гранул твердого сплаву в керамічні ливарні форми 1 служать горизонтальні литникові канали, що мають телескопічне з'єднання 3 з литниковою лійкою 4. Розтоплений метал (сталь) і леговані нікелем гранули твердого сплаву подають у литникову лійку із тиглів 5 і 6 відповідно.

Спосіб реалізовано при литві об'ємно армованих деталей кнопкового типу з діаметром основи 10 мм і діаметром головки 18 мм. Керамічні ливарні форми нагрівали до температури 180 ± 10 °С. Приводили їх в обертання навколо вертикальної осі зі швидкістю 450 ± 20 хв⁻¹, заливали рідку сталь 18ХН2МФЛ при температурі 1620 ± 10 °С і вводили твердий сплав ВК8 в кількості 8 г на одну деталь кнопкового типу.

Після заливання і введення гранул твердого сплаву в литникову лійку 4 ливарні керамічні форми 1 приводили в обертання навколо горизонтальної осі зі швидкістю 2800 ± 20 хв⁻¹, а обертання навколо вертикальної осі зупиняли.

Підвищення стійкості робочих поверхонь деталей кнопкового типу досягається за рахунок зосередження твердого сплаву в робочій частині деталі, оптимального легування металеві матриці армованої зони і збереження початкових властивостей гранул твердого сплаву, легованих нікелем.

Процеси, що відбуваються в об'ємно армованій зоні при реалізації способу, пов'язані з технологічними параметрами армування заготовок деталей кнопкового типу, регулюючи які можна отримати оптимальну структуру металеві матриці армованої зони, що задовольняє різним умовам роботи породоруйнівних елементів бурових доліт, а також осесиметричну форму робочої армованої зони в голівці деталей кнопкового типу.

Одночасно з процесами кристалізації при армуванні під дією відцентрових сил відбувається переміщення на периферію гранул литого карбїду вольфраму, який при контакті з розплавленою сталлю тільки частково розчиняється залежно від товщини легованого нікелем шару, його грануляції та термічного циклу формування армованих заготовок. Термічний цикл процесу відцентрового армування в основному визначається температурою сталі при заливанні, кількістю гранул литого карбїду вольфраму, що вводиться

при армуванні, та температурою нагрівання керамічної ливарної форми. Вплив першого технологічного параметру незначний у зв'язку з невеликими технологічними можливостями його зміни.

Стійкість об'ємно армованої деталі кнопкового типу визначається в основному стійкістю робочої армованої зони, яка в свою чергу залежить від структури металу матриці, кількості та концентрації введеного при армуванні литого карбиду вольфраму і форми армованої зони.

Збільшення частоти обертання керамічної ливарної форми навколо горизонтальній осі більше 3000 хв^{-1} призводить до підвищення концентрації гранул твердого сплаву в голівці зубця і зменшення процентного вмісту металу матриці, що природно знижує міцність головки заготовки деталі кнопкового типу. Навпаки, зменшення частоти обертання менше 2500 хв^{-1} призводить до значного зниження концентрації твердого сплаву в армованій зоні і до зниження її абразивної стійкості. Тому частота обертання ливарної форми навколо горизонтальної осі $2500 - 3000 \text{ хв}^{-1}$ є оптимальною. Обертання керамічної ливарної форми навколо вертикальної осі з розташуванням осі поза порожниною цієї форми сприяє кращому її заповненню рідким металом (сталлю) і армуючими гранулами твердого сплаву робочої частини заготовки бурового долота (пордуруйнівних елементів).

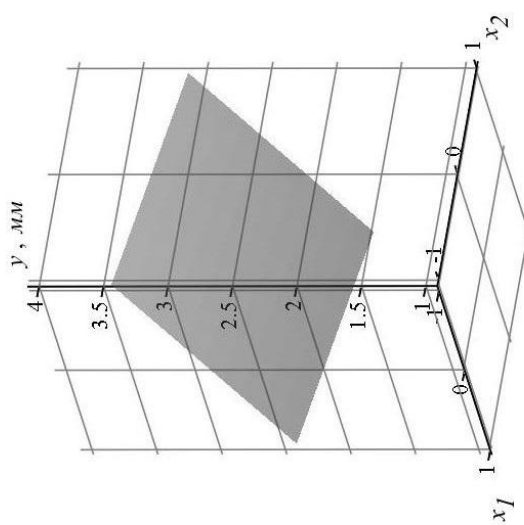
Випробовування на зношування об'ємно армованих породуруйнівних елементів бурових доліт проводили на установці описаній в роботі [37]. Технологія відцентрового армування порівняно з традиційною дозволяє збільшити абразивну стійкість робочої частини деталей в 1,21 рази, що дає можливість отримати економію в експлуатації. Економічна ефективність від впровадження запропонованого технічного рішення впливає із забезпечення високої роботоздатності породуруйнівних елементів бурових доліт за рахунок збільшення їх зносостійкості. Порівняно з відомими технологіями в даній області запропоноване технічне рішення дає можливість підвищити довговічність бурових доліт і продуктивність роботи їх у процесі буріння свердловин.

Додаток Ж

Поверхні відгуку

$$y(x_1, x_2, x_3, x_4) := 2.79 - 0.52 \cdot x_1 - 0.15 \cdot x_2 - 0.29 \cdot x_3 - 0.22 \cdot x_4$$

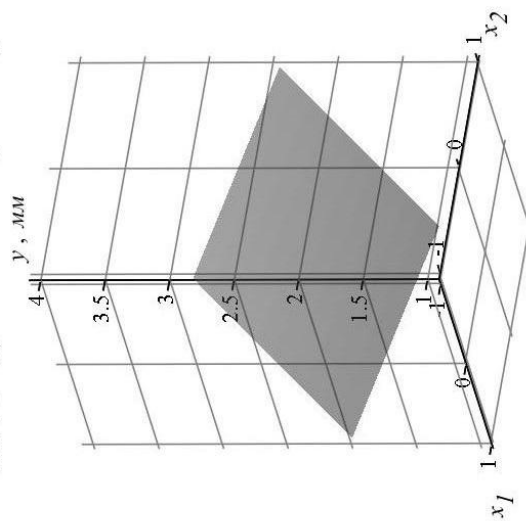
$$y_{12}(x_1, x_2) := 2.79 - 0.52 \cdot x_1 - 0.15 \cdot x_2$$



y_{12}

$$y_{112}(x_1, x_2, x_3, x_4) := 2.23 - 0.42 \cdot x_1 - 0.19 \cdot x_2 - 0.15 \cdot x_3 - 0.27 \cdot x_4$$

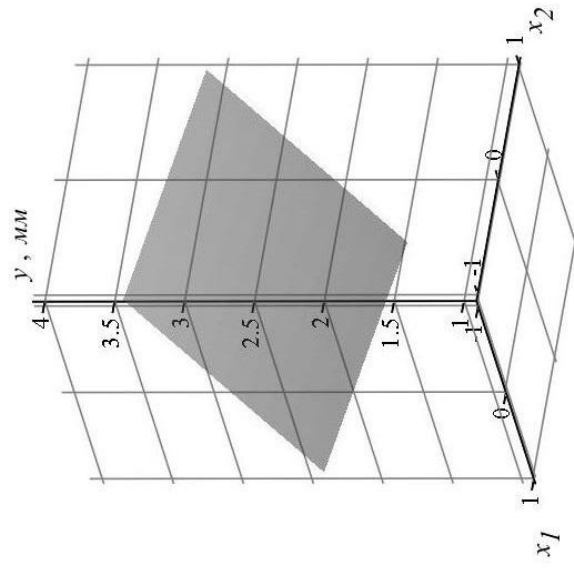
$$y_{112}(x_1, x_2) := 2.23 - 0.42 \cdot x_1 - 0.19 \cdot x_2$$



y_{112}

$$y(x_1, x_2, x_3, x_4) := 2.79 - 0.52 \cdot x_1 - 0.15 \cdot x_2 - 0.29 \cdot x_3 - 0.22 \cdot x_4$$

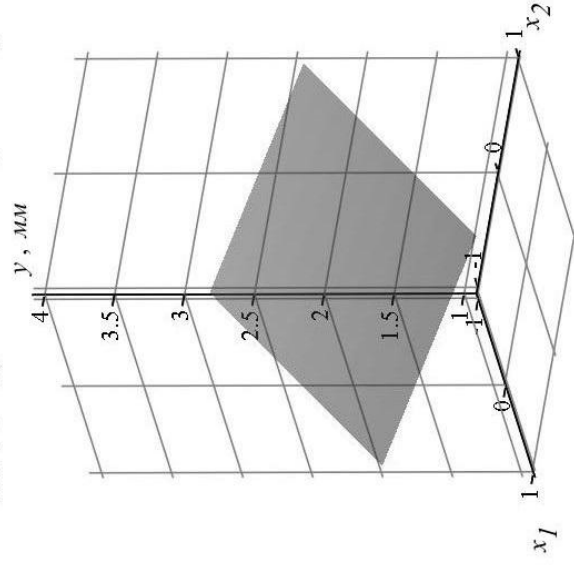
$$y_{I2}(x_1, x_2) := 2.79 - 0.52 \cdot x_1 - 0.15 \cdot x_2$$



y_{I2}

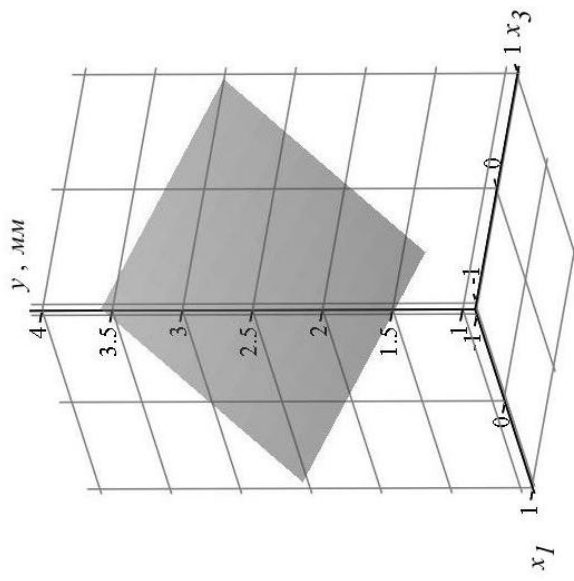
$$y_{II}(x_1, x_2, x_3, x_4) := 2.23 - 0.42 \cdot x_1 - 0.19 \cdot x_2 - 0.15 \cdot x_3 - 0.27 \cdot x_4$$

$$y_{II2}(x_1, x_2) := 2.23 - 0.42 \cdot x_1 - 0.19 \cdot x_2$$



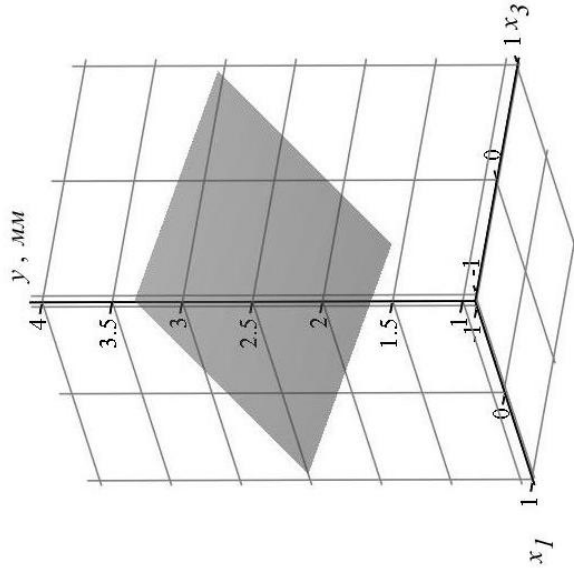
y_{II2}

$$y_{I3}(x_I, x_3) := 2.79 - 0.52 \cdot x_I - 0.29 \cdot x_3$$



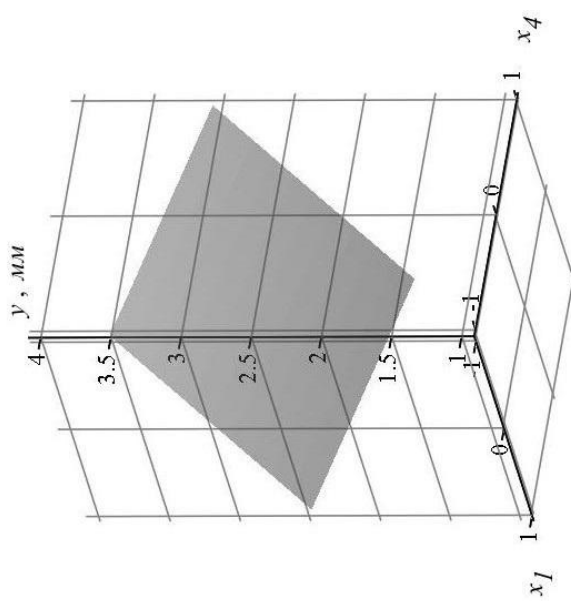
y_{I3}

$$y_{II3}(x_I, x_3) := 2.79 - 0.42 \cdot x_I - 0.15 \cdot x_3$$



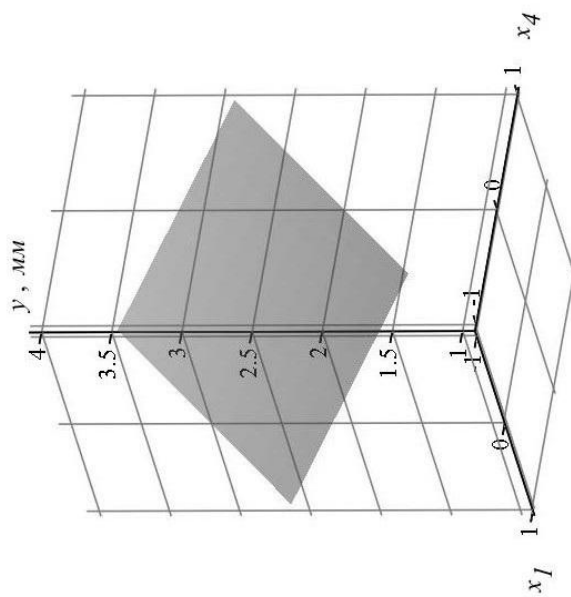
y_{II3}

$$y_{14}(x_1, x_4) := 2.79 - 0.52 \cdot x_1 - 0.22 \cdot x_4$$



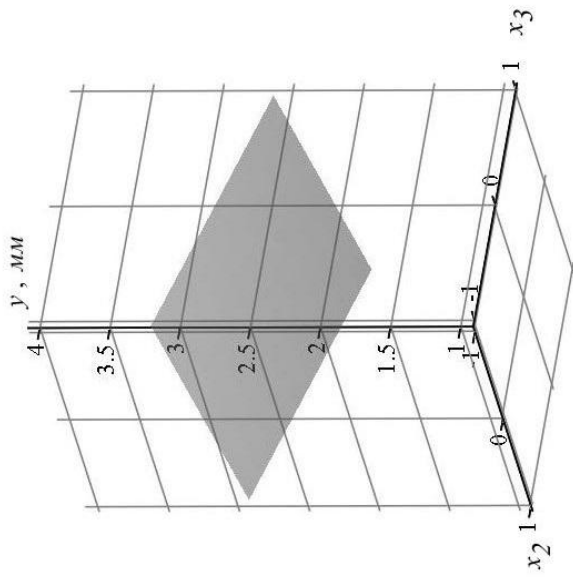
y_{14}

$$y_{14}(x_1, x_4) := 2.79 - 0.42 \cdot x_1 - 0.27 \cdot x_4$$



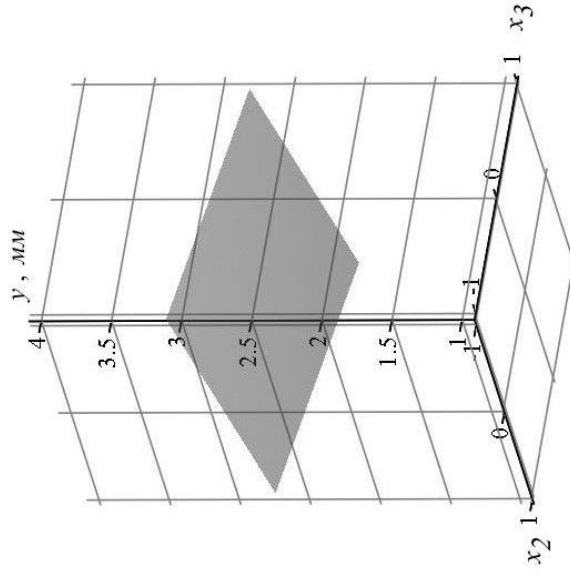
y_{14}

$$y_{23}(x_2, x_3) := 2.79 - 0.15 \cdot x_2 - 0.29 \cdot x_3$$



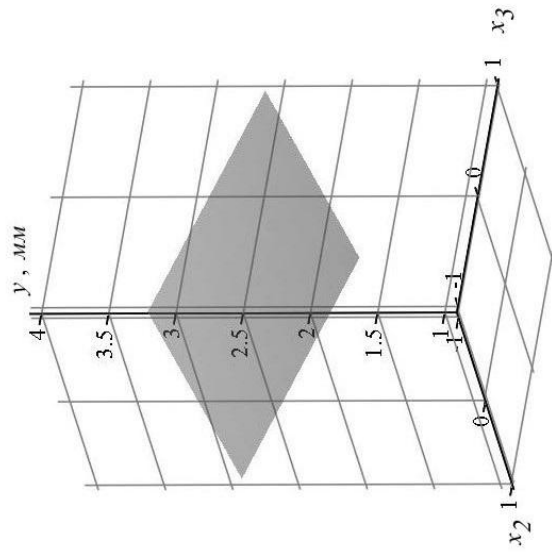
y₂₃

$$y_{M23}(x_2, x_3) := 2.79 - 0.19 \cdot x_2 - 0.15 \cdot x_3$$



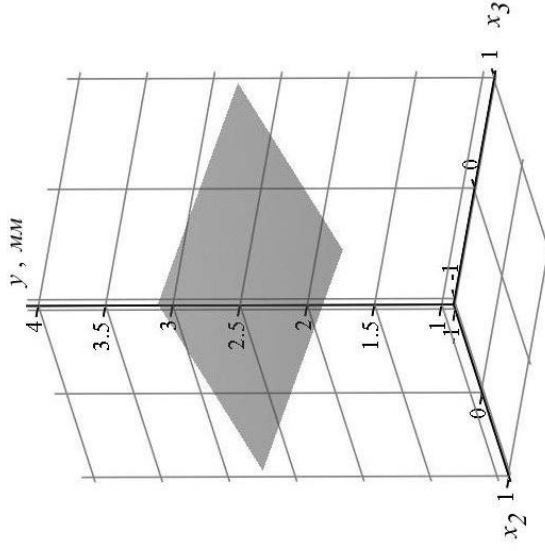
y_{M23}

$$y_{23}(x_2, x_3) := 2.79 - 0.15 \cdot x_2 - 0.29 \cdot x_3$$



y₂₃

$$y_{\pi 23}(x_2, x_3) := 2.79 - 0.19 \cdot x_2 - 0.15 \cdot x_3$$



y_{π23}

Додаток 3

«Затверджую»:

Директор ТзОВ МНВЦ «Епсілон ЛТД»

Милипченко О.В.

30 квітня 2015 р.



АКТ

**впровадження результатів дисертації
Кустова Віктора Володимировича на тему:
«Підвищення якості поверхонь деталей формуванням
композиційних покриттів комплексним методом»,
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування**

Даний акт складено у тому, що Кустовим Віктором Володимировичем впроваджено в ТзОВ Міжгалузекий науково-виробничий центр «Епсілон ЛТД» м. Івано-Франківськ розроблену технологію формування композиційних покриттів комплексним методом на деталях типу тіл обертання.

Технологічний процес включає наступні основні операції:


- підготовка поверхні деталі;
- напилення робочого шару композиційного покриття електродуговим методом з використанням суцільних сталевих дротів та порошків карбіду титану або карбіду вольфраму, які вводять у металоповітряний потік із живильника та верхнього – технологічного шару покриття тільки із матеріалу сталевих дротів;
- механічна обробка технологічного шару покриття;
- віброелектроіскрове легування обробленої поверхні покриття в середовищі гранул твердого сплаву;
- фінішна обробка поверхні;
- контроль якості поверхні.

Вказана технологія використовується для зміцнення нових та відновлення зношених деталей типу тіл обертання: захисних втулок валів відцентрових насосів; півосей та інших деталей транспортних засобів.

Застосування розробленої технології формування композиційних покриттів комплексним методом взамін напилення композиційних покриттів плазмовим методом дозволило знизити витрати на зміцнення за рахунок нижчої вартості обладнання для електродугового напилення у порівнянні із обладнанням для плазмового напилення, а також і витрати на механічну обробку, так як здійснюється точіння зовнішньої циліндричної поверхні із матеріалу суцільних дротів. Дана технологія є екологічно безпечною.

Результати стендових випробовувань захисних втулок валів відцентрових насосів показали підвищення їх ресурсу роботи в 1,5 рази порівняно із серійними.

Представники ІФНТУНГ:

асистент  Кустов В.В.доцент  Роп'як Л.Я.асистент  Присяжнюк П.М.

Представники ТзОВ МНВЦ «Епсілон ЛТД»:

директор з виробництва  Луцак Л.Д.зав. лабораторією  Сенютович А.Р.гол. бухгалтер  Акімцова О.М.

ГОСТ 3.1105-84 Форма 2

| | |
|---------|--|
| Дубл. | |
| Взамін. | |
| Підпис | |

| | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

| | |
|-------------------------|--|
| ТзОВ МНВЦ «Елсілон ЛТД» | |
| | |
| | |



КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТІВ

на технологічний процес

формування композиційних покриттів комплексним методом на захисних втулках валів відцентрових насосів

| | | |
|----------------|---------------|-------------|
| Розробив | <i>Кузов</i> | Кустов В.В. |
| Перевірив | <i>Роп'як</i> | Роп'як Л.Я. |
| Нормоконтролер | <i>Луцак</i> | Луцак Д.Л. |

Впроваджено у виробництво:
Акт від «30» квітня 2015 р.

ТЛ



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Генеральний директор ТЗОВ «Нафтогазтехнологія»

Гусак М.М.

« 07 » травня 2015 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

**результатів дисертаційної роботи Кустова Віктора Володимировича,
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування**

1. *Детальна назва заходу, який впроваджується.* Технологічний процес і обладнання для формування композиційних покриттів комплексним методом на бурових замках.

2. *Тема, завдання, наукове дослідження, результатом яких є розроблений захід.* Дисертаційна робота Кустова В.В. «Підвищення якості поверхонь деталей формуванням композиційних покриттів комплексним методом».

3. *Назва підприємства, де зроблено впровадження.* Товариство з обмеженою відповідальністю «Нафтогазтехнологія», м. Івано-Франківськ.

4. *Зміст впровадження.*

4.1. Технологічний процес формування композиційних покриттів комплексним методом на циліндричній поверхні деталей бурових замків для алюмінієвих бурильних труб включає такі операції:

- підготовка поверхні деталей бурового замка (ніпеля і муфти);
- напилення шару композиційного покриття електродуговим методом з використанням суцільних алюмінієвих дротів та порошків молібдену або титану, які вводять у металоповітряний потік із живильника з одночасним віброелектроіскровим легуванням покриття в середовищі гранул твердого сплаву;
- контроль якості зміцнення.

4.2. Дослідно-промислова установка та оснащення для формування композиційних покриттів комплексним методом на деталях типу тіл обертання містить такі основні вузли: електродуговий металізатор з порошковим живильником, джерело живлення електродугового металізатора, систему подачі стисненого повітря, обертач деталі, контейнер для гранул твердого сплаву, вібратор, джерело живлення для віброелектроіскрового легування, систему вентиляції, систему автоматизованого керування.

5. *Основні результати впровадження.* Технологія формування композиційних покриттів комплексним методом та обладнання застосовується взамін електродугового наплавлення робочих поверхонь бурових замків. Це дозволило знизити витрати на зміцнення за рахунок виключення додаткової операції механічної обробки замкових різьб, яка застосовувалась після електродугового наплавлення робочих поверхонь бурових замків для усунення термічної деформації різьб.

Результати промислових випробовувань бурових замків ЗШ-178 з композиційними покриттями при роторному бурінні свердловини показали підвищення ресурсу роботи в 1,4 рази порівняно із серійними.

Представники ІФНТУНГ:

Асистент  Кустов В. В.Доцент  Бурда М. Й.

Представники ТЗОВ «Нафтогазтехнологія»:

Технічний директор  Малярчук О. Б.Головний технолог  Фабуляк Л. І.

ГОСТ 3.1105-84 Форма 2

| | |
|---------|--|
| Дубл. | |
| Взамін. | |
| Підпис | |

| | | | |
|--|--|--|--|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

| | |
|---------------------------|--|
| ТзОВ «Нафтогазтехнологія» | |
| | |

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Генеральний директор
 ТзОВ «Нафтогазтехнологія»
 Гусак М. М.
 «07» травня 2015 р.



КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТІВ

на технологічний процес
 формування композиційних покриттів комплексним методом
 на деталях бурових замків

Розробив *[Signature]* Кустов В. В.
 Головний технолог *[Signature]* Фабуляк Л. І.
 Нормоконтролер *[Signature]* Луцак Д. Л.

Впроваджено у виробництво:
 Акт від «07» травня 2015 р.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор

Інституту інженерної механіки ІФНТУНГ

Романишин Л.І.

«20» лютого 2015 р.

ДОВІДКА

про використання в навчальному процесі наукових результатів дисертаційної роботи Кустова Віктора Володимировича, представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування

Наукові результати дисертаційної роботи Кустова В. В. використовуються у навчальному процесі кафедри технології нафтогазового машинобудування Інституту інженерної механіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу при підготовці бакалаврів, спеціалістів і магістрів за напрямком «Інженерна механіка».

| Навчальна дисципліна | Назва розділу в робочій програмі | Основні результати досліджень, які використовуються в навчальному процесі |
|---|--|--|
| Технологічні основи машинобудування | Способи обробки заготовок. Припуски | Методика визначення припусків на механічну обробку деталей з покриттями, аналіз точності |
| Сучасні технологічні методи зміцнення деталей машин | Зміцнення та відновлення деталей машин за допомогою напилення та наплавлення | Комплексний метод формування композиційних покриттів, який поєднує електродугове напилення та віброелектроіскрове легування |
| Обладнання і транспорт механообробних цехів | Експлуатація та ремонт обладнання | Технологія формування композиційних покриттів електродуговим методом із матеріалу суцільних дротів і частинок порошку, який вводять із живильника в металоповітряний потік |

Як основна і додаткова література при вивченні вказаних навчальних дисциплін використовуються такі праці Кустова В.В.:

1. Кустов В. В. Моделювання руху частинок порошку при напиленні покриттів електродуговим методом / В. В. Кустов, М. В. Маковійчук, Л. Я. Роп'як // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк, 2011. – Вип. 41 – С. 188–197.

2. Кустов В. В. Технологія і установка для комплексного зміцнення замків буринних труб / В. В. Кустов // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – № 2 (39). – С. 33–39.

3. Кустов В. В. Вплив технологічних параметрів обробки в іскрових розрядах на показники газотермічних покриттів / В. В. Кустов, І. О. Шуляр, А. К. Смаглюк, П. І. Войтенко // Нафтогазова енергетика. – 2014. – № 1. – С. 105–111.

4. Семененко О. М. Дослідження та моделювання впливу конструктивного оформлення і технологічних параметрів виготовлення на показники зношування армованого озброєння шарошkových доліт / О. М. Семененко, З. М. Одосій, В. В. Кустов // Проблеми міцності. – 2014. – № 4 (430). – С. 162–171.

5. Кустов В. В. Аналіз точності токарної обробки зовнішньої циліндричної поверхні втулок / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1, Ч. 1 (90). – С. 86–93.

Таким чином, основні результати дисертаційної роботи асистента кафедри ТНМ Кустова Віктора Володимировича широко використовуються в навчальному процесі кафедри технології нафтогазового машинобудування Інституту інженерної механіки ІФНТУНГ, що сприяє підвищенню рівня професійної підготовки студентів.

Зав. кафедри ТНМ,
д.т.н., професор

Петрина Ю.Д.

Асистент кафедри ТНМ

Кустов В. В.