

Кабінет Міністрів України  
Національний університет біоресурсів і природокористування України

## МОНОГРАФІЯ

# **ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Київ – 2022

*Рекомендовано до видання рішенням вченої ради Національного університету біоресурсів і природокористування України (Протокол № 9 від 27 травня 2022 року)*

**Рецензенти:**

**Федорейко Валерій Степанович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри машинознавства і транспорту ТНПУ ім. В. Гнатюка

**Червінський Леонід Степанович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електротехніки, електроенергетики та електромеханіки Білоцерківського національного аграрного університету.

**Мищенко Анатолій Васильович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплотехніки НУБіП України.

**Автори:**

Заблудський М.М., Наливайко В.А., Радько І.П., Окушко О.В., Радько І.В.  
**«ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМЦЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ»** [Монографія]. – К.: «Видавничий центр НУБіП України», 2022. – 268с.

В монографії приведені результати теоретичних та експериментальних досліджень. Використані різні технологічні процеси напилення, металографічні та рентгеноспектральні аналізи робочого шару напилення. Застосовані принципи аналізу просторово-часової структури розвитку теплових і динамічних процесів, що супроводжують удар, розтікання і кристалізацію напилених частинок при формуванні покриттів.

Приведено результати дослідження процесу взаємодії частки з напиленою поверхнею, який можна представити фазами утворення фізичного контакту, активації контактних поверхонь з утворенням хімічних міжатомних зв'язків на межі розподілу, розвитку об'ємної взаємодії матеріалів. Встановлено, що якість та формування газоплазмового покриття обумовлюється міцністю зчеплення покриття з основою, коефіцієнтом використання порошку та пористістю покриття. Досліджено електроерозійну стійкість відновлюваних контакт-деталей магнітних пускачів серії ПМЛ -3100 04А і ПМЛ -4100 04А в категорії застосування АС-3.

Проведено металографічний та рентгеноструктурний аналіз відновлених робочих поверхонь після випробування їх на електроерозійну стійкість.

Монографія виконана на матеріалах досліджень держбюджетної тематики «Розробка технології відновлення і зміцнення деталей електрообладнання з використанням композиційних матеріалів» № держреєстрації 0109U003213

**УДК 621.182.23-52:378.4:63**

**ББК 31.252**

©.Заблудський М.М., Наливайко,

І.П. Радько, А.В. Окушко, Радько І.В.

**ISBN**

© Видавництво «Видавничий центр  
НУБіП України», 2022

## ЗМІСТ

Передмова.....	7
1. Сучасний рівень розвитку відновлення розривних контактів в електричних апаратах.....	10
1.1 Види зносу і класифікація розривних електричних контактів залежно від навантаження.....	10
1.2 Електрична дуга на контактах електричного апарату.....	11
1.3 Механізм електродугової ерозії.....	11
1.4 Загальні закономірності електродугової ерозії.....	13
1.5 Типи контактних матеріалів, що застосовуються в електричних апаратах.....	14
1.6 Технологія виготовлення спечених електричних контактів...	18
2. Особливості роботи комутаційних електричних апаратів та контактних систем .....	28
2.1. Низьковольтні електричні апарати.....	28
2.2 Процеси у міжконтактному проміжку, що визначають ерозію робочих поверхонь електричних контактів.....	36
2.2.1 Причини розвитку ерозії поверхні контактів .....	36
2.2.2 Розподіл температури на поверхні контактів .....	39
2.2.3 Розвиток дугового процесу та його особливості.....	41
2.2.4 Вплив магнітного поля на переміщення основи електричної дуги по робочій поверхні контактів.....	44
2.3 Процеси, що характеризують термоемісійну активність елементів складів композицій електричних контактів.....	48
2.3.1 Електронно-енергетичний стан поверхні катода електричних контактів.....	48
2.3.2 Розподіл частинок за енергетичними рівнями та визначення роботи виходу електронів.....	52
2.3.3 Основні методи активування, що сприяють зміні властивостей складів композицій електричних контактів.....	58
2.3.4 Способи та результати активування робочої поверхні електричних контактів.....	61
2.3.5 Дослідження складів композицій електричних контактів із активними складовими .....	65
3 Аналіз способів відновлення електричних контактів.....	72
3.1 Основні способи отримання напиленої поверхні.....	72

3.2	Газовогняні напилення.....	73
3.3	Електричні методи напилення.....	77
3.4	Характеристика обладнання для електротермічної технології напилення.....	82
3.5	Товщина покриття відновленого контакту і методика її визначення.....	92
3.6	Високочастотне індукційне напилення.....	99
3.7	Порівняльний аналіз методів напилення.....	101
4	Вплив кліматичних факторів зовнішнього середовища на електричну ерозію контактів.....	105
4.1	Вплив хімічного складу середовища.....	105
4.2	Вплив температури.....	108
4.3	Вплив відносної вологості.....	109
4.4	Вплив атмосферного тиску.....	110
5	Дослідження впливу умов комутації на характеристики дуги та Віники електродугової стійкості контактних матеріалів на основі міді.....	113
5.1	Вольт-амперні характеристики електричної дуги та умови... ..	113
5.2	Дослідження надійності контактування.....	115
5.3	Розрахунок величини дугової ерозії контактів.....	120
6	Вплив кліматичних факторів зовнішнього середовища на перехідний опір контактів.....	124
6.1	Загальні відомості.....	124
6.2	Вплив хімічного складу середовища.....	126
6.3	Вплив температури.....	128
6.4	Вплив відносної вологості.....	130
6.5	Вплив атмосферного тиску.....	130
6.6	Дослідження залежності перехідного опору від концентрації агресивних газів виробничої атмосфери.....	133
6.7	Обґрунтування типу матеріалу та технології його виробництва залежно від сфери застосування контактного вузла.....	139
7	Моделі формування металопокриття та структурні схеми керування кінетикою утворення фізико-механічних властивостей відновлення контактних вузлів електричних апаратів.....	143
7.1	Моделі формування покриттів.....	143
7.2	Дослідження перехідної зони.....	147

7.3	Загальні відомості та будова покриття.....	151
7.4	Формування покриття та міцність зчеплення в процесі напилювання.....	155
7.5	Коефіцієнт використання порошку.....	165
7.6	Пористість газоплазмового покриття.....	168
7.7	Дослідження фізико-хімічних процесів руху і нагрівання часток в потоці плазми.....	169
8	Установки для напилення на зношені деталі електрообладнання....	176
8.1	Технічні характеристики установок для детаноційно- газового напилення на зношені деталі електрообладнання...	176
8.2	<b>Експериментальна установка і методика для дослідження електромагнітних пускачів з напиленими контакт-деталлями.</b>	187
9	Експериментальні дослідження міцності зчеплення композиційних контактних матеріалів на зношені деталі електрообладнання.....	196
9.1	Визначення твердості.....	196
9.2	Оцінка втомленої міцності.....	198
9.3	Оцінка проникності.....	202
9.4	Електроерозійна стійкість контактів.....	204
9.5	Дослідження властивостей контактних вузлів відновлених ЕІЛ.....	206
9.6	Дослідження впливу технологічних параметрів нанесення покриття показників електроерозійної стійкості.....	210
9.7	Дослідження стійкості контактів проти зварювання.....	214
9.8	Дослідження надійності відновлених апаратів.....	217
9.9	Випробування на механічну та комутаційну зносостійкість..	220
10	Експериментальні дослідження електроерозійної стійкості відновлених контакт-деталей електричних апаратів.....	223
10.1	Дослідження впливу характеру навантаження (активний, активно- індуктивний) на електроерозійну стійкість відновлених контакт-деталей.....	223
10.2	Дослідження параметрів електричної дуги (сила струму, час горіння дуги) при комутації струму відновленими контакт- деталлями.....	227
10.3	Розроблення спеціалізованих стендів для дослідження електричної ерозії та перехідного опору контакт-деталей електричних апаратів напругою до 1000 В.....	228
10.4	Обґрунтування вибору складу контактного матеріалу з	234

	виключенням із нього токсичного оксиду кадмію.....	
10.5	Дослідження електроерозійної стійкості контактного матеріалу в залежності від складу і фізико-механічних властивостей інгредієнтів.....	236
10.6	Дослідження електроерозійної стійкості серійних і дослідних зразків контакт-деталей в магнітних пускачах серії ПМЛ.....	237
11	Дослідження мікроструктури і морфології робочих поверхонь відновлених контакт-деталей після випробування їх на електроерозійну стійкість.....	242
11.1	Структурні особливості спечених заготовок комбінованих матеріалів на основі Ag.....	242
11.2	Металографічний та рентгеноспектральний аналіз структури робочої поверхні серійних контактів.....	245
11.3	Дослідження морфології робочих поверхонь електричних контактів.....	248
11.4	Дослідження морфології і мікроструктури відновлених робочих поверхонь при комутації постійного струму.....	251
11.5	Металографічний та рентгеноспектральний аналіз структури; робочої поверхні дослідних контактів.....	256
	Висновки.....	258
	Список використаних літературних джерел.....	259

## ПЕРЕДМОВА

Електричні комутаційні апарати є важливим засобом електрифікації та автоматизації виробничих процесів у агропромисловому комплексі, особливо в тваринництві. Відмова електрообладнання в електроустановках тваринництва призводить до великих втрат продукції, до зниження її якості, тому за наслідками цю відмову можна порівняти із втратою об'єктом енергопостачання. Так, відмова обладнання технологічних систем молочних ферм призводить до зниження надоїв молока на 40 %, а захворюваність худоби зростає до 78 %, що додатково знижує продуктивність тварин ще на 12 %.

Надійність електричних комутаційних апаратів - одна із складних і багатогранних технічних проблем, яка пояснюється наступними об'єктивними причинами:

- різким збільшенням складності і багатофункціональності сучасних технологічних систем;
- екстремальністю умов, в яких експлуатуються електричні комутаційні апарати (високі швидкості, значні прискорення, висока температура, вібрація, наявність хімічно активних реагентів у повітряному середовищі тощо);
- збільшенням відповідальності функцій, які виконує апарат, високою технічною і економічною вартістю відмови.

Статистичний матеріал, який зібраний декількома науково-дослідними організаціями та інститутами, свідчить про те, що в сільському господарстві кожен рік виходить з ладу 20 – 25 %) електродвигунів, а більш як 80 % їх відмов пояснюється недосконалістю технічних рішень та алгоритмів функціонування комутаційно-захисної апаратури з врахуванням специфіки сільськогосподарського виробництва. Це підтверджується щорічним виходом з ладу до 17 % електромагнітних пускачів і 15 % автоматичних вимикачів, а термін служби комутаційних апаратів, які експлуатуються в електроустановках тваринництва, в середньому, складає 0,5 – 3,0 в роки [52], що значно нижче їх технічного ресурсу, при цьому частота відмов у 2 – 2,5 рази більша, ніж для аналогічних апаратів у промисловості.

Контакт-деталі електричних апаратів виготовляються з матеріалів на основі срібла, вартість якого складає 45 – 60 % вартості апарату в цілому. Підвищення надійності роботи апаратів в електроустановках сільського господарства нерозривно пов'язано зі створенням та впровадженням нових контактних матеріалів, які можуть забезпечити задані показники надійності

контакт-деталі, зниження матеріальних витрат на виробництво і експлуатацію реле, економію благородних металів.

В умовах України, де срібло не видобувається і за різкого підвищення цін на благородні метали, виникає гостра потреба заміни срібних і срібловмістких контакт-деталей на нові контакти, що виготовлені з менш дефіцитних та більш технологічних контактних матеріалів. Нанесення покриттів газоплазмовим розпиленням – один з найбільш простих, економічно-доцільних і розвинених процесів відновлення розмірів зношених поверхонь деталей машин і, зокрема, робочих поверхонь контакт-деталей електричних комутаційних апаратів.

Для відновлення контакт-деталей електроапаратів є економічно-ефективний метод – газоплазмове напилення. Він дозволяє отримувати покриття різноманітних типів контактних матеріалів, які характеризуються високою міцністю та електроерозійною стійкістю. Для цього може бути використане не досить складне в експлуатації, але вартісне технологічне обладнання.

Нанесення покриттів газоплазмовим розпиленням – один із методів підвищення надійності та терміну служби контактів і деталей електрообладнання та найбільш простий, економічно-доцільний і розвинений процес відновлення розмірів зношених поверхонь, зокрема, робочих поверхонь контакт-деталей електричних комутаційних апаратів.

Розробка і впровадження у виробництво технологічного процесу газоплазмового напилення для відновлення контактних вузлів має перспективний характер і дає можливість отримати експлуатаційні характеристики апаратів, які майже не поступаються новим за відповідними показниками основного виробництва.



# 1 СУЧАСНИЙ РІВЕНЬ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЕННЯ РОЗРИВНИХ КОНТАКТІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ

## 1.1 Види зносу і класифікація розривних електричних контактів в шмежності від навантаження

Особливістю роботи розривних електричних контактів є виникнення в момент комутації електричних розрядів в формі іскор чи дуг. Ці розряди є причиною трьох головних видів зносу контактів:

- ерозією, зв'язаною з плавленням, випаровуванням і розпиленням металу;
- корозії, зв'язаною з окисненням та іншими реакціями при високій температурі;
- зварювання, зв'язаного з розігріванням та плавленням контактних точок.

Розривні електричні контакти прийнято класифікувати на слабо, середнє і високо навантажувальні.

До області слабких контактів відносяться навантажування (струм і напруга), при яких ще не виникає електрична дуга. Ерозія слабострумівих контактів викликається в основному плавленням контактної точки на аноді та утворенням між контактами рідкого металевого мостика. При цьому і відбувається “тонкий” перенос металу з аноду на катод. Поверхні, що працюють без дуги, окислюються незначно.

Середнім навантаженням прийнято рахувати параметри, при яких вже виникає електрична дуга і переважає ерозія катоду.

Електродугова ерозія катоду відбувається внаслідок бомбардування його позитивним іонами і практично не залежить від нагріву контактів. Корозія при середніх навантаженнях виражається в сильному окисненні анода дугою.

До високих навантажень відносяться параметри, при яких зношування контактів визначається головним чином термічною дією дуги, що обумовлює переважно ерозію аноду, внаслідок термічної дії дуги, метал плавиться, випаровується та розбризкується. Втрати металу на аноді при цьому різко зростають і супроводжуються сильним окисненням контактних поверхонь.

Значення параметрів для областей слабо, середнє і високо навантажувальних контактів залежить від матеріалу контактів і середовища в якому вони працюють.

## 1.2. Електрична дуга на контактах електричного апарату

Стійкий дуговий розряд виникає при певних значеннях напруги і струму, які залежать від матеріалу контактів і віддалі між ними.

В структурі каналу дугового розряду розрізняють катодну область, позитивний стовп і анодну область дуги.

На дуговому розряді між контактами з'являється падіння напруги:

$$U_{\delta} = U_k + U_a + U_{cm}. \quad (1.1)$$

де  $U_k$  – катодне падіння напруги;  $U_a$  – анодне падіння напруги;  $U_{cm}$  – падіння напруги в стовпі дуги.

Катодне падіння напруги ( $U_k$ ) характеризує процеси, пов'язані з бомбардування катоду позитивними іонами, утворення нагрітих до високих температур катодних плям на поверхні катоду називається емісією електродів. Анодне падіння напруги обумовлено надлишком негативного просторового заряду, що утворився бомбардуванням аноду електронами, які володіють великою кінетичною енергією.

Між зонами анодного і катодного падінь напруг знаходиться стовп дуги, який складається із газу іонізованих частинок (електронів, іонів) і парів металів контактів.

Дуговий розряд характеризується високою густиною струму в стовпі дуги та високою температурою в середині стовпа, яка досягає 5000 °К, а при сильній деіонізації 12000 – 15000 °К.

Мінімальними умовами виникнення електричної дуги є струм біля 0,5 А і напруги 15 – 20 В.

Значення  $U_{\min}$  і  $I_{\min}$  збільшуються з збільшенням температури плавлення металів.

При встановленні на катод та анод різних металів  $I_{\min}$  дуги здійснюється у порівнянні  $I_{\min}$  у електродів з однакових металів.

Параметри запалювання дуги впливають на величину електродугової ерозії контактів.

## 1.3 Механізм електродугової ерозії

Пошуки пояснень явища електродугової ерозії привели до появи різних гіпотез про її механізм.

Електродугова ерозія пов'язувалась з вириванням частинок під дією електростатичного поля (Вільямс), з механічним руйнуванням під дією струменів металу з протилежного електроду (Мендельштам), з бомбардуванням катода іонами, й анода електронами (Хольм), з тепловими процесами, що розвиваються в зоні розряду (Назаренко).

Найбільше визнання отримала теплова гіпотеза. Розвиваючи теплову гіпотезу (Н.Н. Золотих показав, що ерозія електродів визначається плавленням і випаровуванням обмеженого об'єму металу під дією плоского джерела тепла.

Викадання розплавленого металу забезпечується електродинамічними і механічними силами. Поняття “плоске“ (поверхневе) джерело тепла визначає джерело теплової енергії, що передає тепло на поверхню електродів безпосередньо із каналу розряду за рахунок бомбардування поверхні електронами (іонами) та переходу із газорозрядного стовпа.

В рамках теплової гіпотези А.С. Зінгерман запропонував іншу схему викидання металу.

Під дією поверхневого тепла на поверхні електродів з'являються зони плавлення. В глибині розплавленої зони за рахунок неоднорідностей створюються мікрообласті з температурою, що перевищує температуру випаровувань металу, що приводить до вибухового випаровування мікрооб'єму, викиданню, що лежать над ним шарів рідкого металу.

Деякі дослідники рахують, що розплавлення металу в об'ємі лунки відбувається за рахунок прямої дії струму по закону Джоуля-Ленца. Таке джерело теплової енергії отримало назву об'ємного джерела тепла.

В більш пізніх роботах електроерозія розглядається як наслідок сумісної дії плоского та об'ємного джерела тепла. Кожний із них при певних умовах може мати переважний вплив.

Теплова гіпотеза механізму ерозії є найбільш розробленою та експериментальною перевіреною. Однак і вона залишає відкритими багато запитань. Наприклад, про динаміку викидання металу, про характер надходження тепла, процеси в каналі розряду та багато інших.

Деякі з цих питань в даний час пояснюються утворенням катодних і анодних плям дуги, які є джерелом високошвидкісних струменів пару із матеріалу електродів, що поставляють в міжелектродний проміжок для підтримання горіння дуги. Витрата металу в струмені визначає ерозію електродів в паровій фазі. Розрізняють плями першого і другого роду, які відрізняються рухливістю, розмірами, тривалістю життя їм іншому місці, способом “виробництва“ пару і величини ерозії.

Теорія катодних і анодних плям знаходиться в стадії розвитку.

#### **1.4. Загальні закономірності електродугової ерозії**

Найбільш загальні закономірності електродугової ерозії були сформульовані в роботах Б.Р. Лазаренко.

Б.Р. Лазаренко встановив, що величина і знак ерозії металу визначаються параметрами розряду, складом середовища, в якому працюють електроди, і матеріалом, із якого вони виготовлені.

В роботах Б.Р. Лазаренко показано, що при зміні параметрів електричного розряду і постерігається інверсія електричної ерозії – знос катоду змінюється зносом аноду (ерозія змінює знак). При інверсії ерозія проходить через найменше чи нульове значення, внаслідок чого досягається суттєве зменшення величини зносу електродів.

П.Л. Правоверов показав, що інверсія електродугової ерозії може відбуватися при зміні фазової будови матеріалу.

С.Л. Мапдсльштам і С.М. Райський встановили, що електродугова ерозія зменшується при збільшенні віддалі між електродами.

При цьому на малих проміжках анод руйнується значно сильніше ніж катод, а на великих віддалях катод руйнується сильніше аноду. Таким чином зміна віддалі між електродами може приводити до інверсії електродугової ерозії.

В роботах Б.Н. Золотих показано, що ерозія не лінійно залежить від тривалості імпульсу. Максимальна ерозія спостерігається при оптимальній тривалості імпульсу. При збільшенні чи зменшенні оптимальної тривалості ерозія зменшується.

В. Вільсон визначив, що електродугова ерозія лінійно залежить від величини струму. При збільшенні струму ерозія збільшується. В роботах Н.Л. Правовойра показано, що електродуговий розряд вибірково взаємодіє з частинками найменш тепло електропровідної фази, визиваючи їх переважно ерозію.

## 1.5. Типи контактних матеріалів, що застосовуються в електричних апаратах

**Електричним контактом** називається таке з'єднання двох струмопровідних елементів доцільної форми, що забезпечує безперервність електричного кола.

Сукупність струмопровідних елементів, з'єднаних між собою тим чи іншим методом, називають **контактним вузлом**.

Контактні вузли, що застосовуються в електричних апаратах, можна розділити на два типи: *контактні з'єднання* і *контакти електричного кола*.

При роботі апарату робочі поверхні струмопровідних елементів знаходяться нерухомо одна відносно другої, хоча разом можуть знаходитися в русі.

Контактні з'єднання розділяються на чотири групи:

1. *Розбірні* – в яких притискання робочих поверхонь здійснюється болтами, шпильками, пружинами тощо;

2. *Роз'ємні* – які можуть бути розімкнуті, а потім замкнуті без їх розборки (штепсельні розйоми);

3. *Нерозбірні* – які не можуть бути розімкнуті без їх руйнування пайка, зварювання, клейка тощо);

4. *Контактні з'єднання з гнучкими зв'язками*, які являють собою розбірні чи не розбірні, що з'єднуються між собою гнучкими струмопровідними елементами.

Елементи електричного кола поділяються на два типи: *комутаційні*, *ковзання*.

Комутаційні контакти здійснюють розмикання, замикання чи перемикавання електричного кола.

**Контакти ковзання** – це такі, в яких відбувається поступове чи переміщення робочої поверхні одного елемента по поверхні другого, без порушення електричного контакту між ними.

Електричні контакти умовно діляться на:

- сильнонавантажені,
- середньонавантажені,
- слабонавантажені.

Для кожної області струмового навантаження і напруги характерний певний клас **електричних** матеріалів з контактними властивостями, потрібними для певних умов роботи. Проте всі електроконтактні матеріали

повинні мати високу тепло- і електропровідність, яка може коливатися в певних межах для контактної області застосування.

Високою тепло- і електропровідністю, низьким рівнем контактного опору, високою пластичністю володіють метали 1 групи періодичної системи: мідь, срібло, золото. Однак вони мають низьку твердість, недостатньо міцні і характеризуються порівняно низькою електроерозійною і механічною стійкістю до зношення.

Найбільш широке застосування знайшло срібло. Область застосування його в електротехніці найширша: від струмів на долі Ампер до силових контактів. Проте срібло ряд недоліків:

- низька міцність;
- схильність зварюватися при комутації електричного струму;
- схильність до залипання при високому контактному тиску;
- схильність до направлено переносу матеріалу при комутації постійного струму;
- схильність до сульфідної корозії, особливо при одночасному впливі вологи та високої температури;
- схильність до “розтікання” при дотику з ізоляційними матеріалами під дією електричного потенціалу у вологому середовищі, що може визвати коротке замикання, особливо у перемикачах.

З метою усунення вказаних недоліків срібла в нього вводять різні добавки: метали, оксиди металів, різні сполуки металів і т.д.

Найбільш перспективними матеріалами для повітряних потужних вимикачів є W-Ag та Mo-Ag, а для контактів масляних вимикачів матеріали на основі W-Cu та Mo-Cu каркасної будови [22]. Ерозійна стійкість композиційних матеріалів, таких як Fe-Cu, Fe-Cu-Sb-Fe, W-Fe-Cu та інших при розряді у вакуумі виявляється на порядок вище, ніж у міді [24]. Ці матеріали широко застосовуються у вакуумних вимикачах.

Для середньонавантажених контактів використовують матеріали на основі срібла і оксидів, срібла і нікелю, срібла нікелю і графіта. Із оксидів, які використовуються як добавки до срібла найбільше застосування одержав оксид кадмію, електропровідність якого значно краща інших оксидів. Електропровідність його при 20°C становить

$$10^{-1} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}; \text{ для } \text{ZnO} \cdot 10 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}; \text{ CuO} \cdot 10 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1} \text{ MnO}_2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1}$$

Крім того, оксид кадмію при розпалі поглинає до 2 КДж тепла на 1 грам речовини, яка дисоціює, а об'єм парогазової суміші перевищує об'єм CdO в 10 рази. В Процесі комутації бурне виділення газів механічно здуває дугу і

примушує її рухатися по поверхні контактів, де іонізує плазму та скорочує час її існування.

Оксиди, які вводяться в срібло, бувають двох типів і роль їх в підвищенні електроконтактних властивостей срібла різна. Оксиди, температура розкладання яких нижча температури кипіння срібла ( $\text{CuO}$ ,  $\text{CdO}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{MoO}_3$  та ін.), і оксиди, температура розкладання яких вище температури кипіння срібла ( $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та ін.) [16].

Дія оксидів першої групи аналогічна дії оксидів кадмію. Оксиди другої групи забезпечують рухомість дуги. В цьому випадку при переміщенні дуги по поверхні електродів проходить дисипація енергії дуги та зменшується кількість теплової енергії, яку поглинають контакти.

В даний час широко застосовуються оксиди  $\text{SbO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ , вони в інтервалі температур 500 – 1500 °С мають тиск пару ще більший, ніж оксид кадмію. Це дозволяє позбутися від матеріалу, який має токсичний кадмій [18]. Аналогічно дії оксидів ведуть себе селениди вольфрама, молібдена, ніобія, тантала, які розкладаються при температурі 800 °С [26].

Крім ефекту зміцнення і відсувного ефекту, оксиди найбільш ефективно знижують схильність матеріалу до зварювання при комутації електричного струму за рахунок розділення дійсної поверхні контактування на безліч дрібних частин, йкращий в цьому відношенні є оксид кадмію, потім цинку та свинцю [45].

При введенні в основу матеріалу добавок необхідно врахувати, що властивості будь-якої індивідуальної речовини зумовлюються її природою і об'єднуються певною функціональною залежністю.

Змінюючи тим чи іншим шляхом одну або ряд властивостей в металі в бажаному ямку ми стикаємось із зміною всіх його властивостей і далеко не завжди в потрібному для нас аспекті. Тому треба вибирати такий склад і таке співвідношення компонентів при якому можна добитися оптимальних електроконтактних і технологічних характеристик. Крім того, вибираючи добавки, сполуки металів тощо, необхідно врахувати їх додаткову взаємодію один з одним та з навколишнім середовищем, а також і в процесі комутації електричного струму, так як при великому термічному навантаженні в основі електричної дуги на робочій поверхні контакту виникають структурні зміни змінюється склад матеріалу, ступінь розподілу складових компонентів в порівнянні з початковою структурою, можуть утворюватися нові сполуки.

Необхідно також враховувати різницю в температурі плавлення матриці та добавок, які вводяться, так як при великій різниці буде дуже нагріватися

матриця, що приведе до її інтенсивного випаровування [34]. Це положення треба врахувати для контактів з великим числом комутацій.

Кількість введених добавок в електропровідну матрицю електроконтактного матеріалу залежить від умов роботи апаратів, в яких використовуються контакти. Для контактів слабонавантажених апаратів з великим строком служби та високою надійністю в роботі оптимальна кількість зміцнюючого матеріалу, що вводиться, повинна відповідати 4 – 5 % (маси) [22].

В цьому випадку забезпечується безперервна матриця, тобто частки тугоплавкого металу (або сполуки металу) оточені матричною основою, що зберігає її високу тепло і електропровідність, пластичність. Введення, наприклад, одного відсотка кобальту достатньо, щоб підвищити твердість срібла на 30 – 35 %, два відсотки – на 60 %. При цьому ерозійна стійкість збільшується в 1,5 рази, механічна зносостійкість в 3 – 4 рази. Електричний опір збільшується на 2 – 5 %, контактний опір залишається без змін.

Для низьковольтних контактів слабо та середньонавантажених апаратів кількість добавок, які вводяться, складає від 10 % до 50 % (по масі). Перспективним є введення комбінованих добавок і добавок, які за своєю дією несуть декілька функцій, як, наприклад, цирконій. Кисень може позитивно впливати дифундуючи в об'ємі контакту, він окислює домішки в сріблі і тим самим підвищує твердість і ерозійну стійкість срібної матриці. Ефективним є одночасне введення в матрицю декількох металів, оксидів, або сплавів металів, наприклад, хрому та нікеля. При виникненні дуги Ni, Cr випаровуються з утворенням іонів хрому та нікеля. Іони хрому легко окислюються до  $Cr_2O_5$  що підвищує опір дуги, струм в дузі зменшується, час горіння зменшується, схильність контактів до оплавлення також зменшується, контактний опір стабілізується [16, 17].

Деякі добавки можуть відігравати допоміжну роль при виготовленні контактного матеріалу, наприклад, підвищувати адгезію на міжфазних межах, за допомогою вісмута, кальція, олова можна впливати на форму і розподіл оксиду кадмію [18].

Дисперсійно-зміцнюючі домішки в міді можуть бути Ti, Zn, фазами дії в даному випадку є утворені в результаті взаємодії з міддю- інтерметаліди  $Cu_3Zn$ ,  $Cu_4Ti$ . Введення подібних домішок особливо доцільне при виготовленні контактів та електродів для контактного зварювання, які витримують: великий контактний тиск при високих температурах [14].



Матеріали для сильнонавантажених вакуумних вимикачів, які комутують електричний струм високої напруги не повинні мати адсорбовані та розчинені гази.

Щоб виключити можливість виникнення перенапруги в системі вимикача при “зрізі струму“, в склад його вводять легколетучі наповнювачі (сурма, вісмут та інші).

В багатьох патентах та заявках крім добавок, зазначених табл.1.1 (графа 2), з метою досягнення ефекту зміцнення срібної матриці вводять ще і метали групи заліза (Fe, Co, Ni) один або декілька в кількості від 0,001 до 1 % [13, 17].

З метою запобігання окислення металів групи заліза, тугоплавких металів та їх сполук (боридів, нітридів тощо) в склад електроконтактного матеріалу вводять графіт, який під дією дуги перетворюється в газ, що відновлює та запобігає їх окисленню.

Оптимальна кількість графіту в цьому випадку становить від 3 до 7 % (по масі). Введення графіту в срібну матрицю 3 % і менше зміцнює срібло [18]. Вміст графіту в мідних контактах, які розмикаються, звичайно не перевищує 5 % (по масі). Композиції з більшим вмістом графіту застосовуються для контактів, які ковзають (електрощітки), електричних машин. Введення в срібло графіту більш ніж 10 % (по масі) погіршує технологічні властивості композиції, а при збільшенні числа комутацій може визвати порушення в ізоляції апарата.

Якість контактів в значній мірі залежить від марки та форми частинок графіту. Форма повинна бути максимально близькою до сферичної. Застосування графіту природних родовищ з лускоподібною формою частинок погіршує якість лугостійких контактів, які розмикаються, так як це призводить до збільшення електричного опору в напрямку проходження струму [38].

## **1.6 Технологія виготовлення спечених електричних контактів**

При створенні електроконтактного матеріалу, який працює в режимі комутації електричного струму або в режимі тертя і комутації струму необхідно правильно обґрунтувати вибір компонентів матеріалу, їх оптимальне співвідношення, умови виготовлення шихти, вибір термомеханічної обробки. Це визначить фізико-хімічні, механічні, теплофізичні властивості матеріалу, необхідний розподіл структурних складових і необхідну дисперсність, що в свою чергу забезпечить потрібні характеристики електроконтактного матеріалу для відповідних умов експлуатації.

Використання технології порошкової металургії дозволяє створити контакти складної будови, що складаються з декількох частин, які представлені

**Спечені сплави і псевдосплави, які використовуються в електротехнічній промисловості для електричних контактів**

Основа композиції	Добавка	Вплив домішки на електроконтактні характеристики
1	2	3
Ag	Ni, Co, Fe	Зменшують розмір зерна, підвищують твердостійкість, властивості міцності, ерозійну стійкість
	W, Mo	Підвищує ерозійну стійкість і зносостійкість
	Cu	Підвищує твердість
	Pd	Підвищує твердість і стійкість до сульфідної корозії
	Sb, Te, Zn, As, In	Підвищує зносостійкість
	Mn, Cu, Na, Zn, Pb, C	Підвищує зносостійкість
	Cu, La, Pb, Ti	Підвищує зносостійкість
	Zn, Cl, Mo, Nb, Br, Th, W	Підвищує ерозійну стійкість
	CdO	Підвищує ерозійну стійкість
	CeO	Для дисперсного зміцнення володіє значно більшою стабільністю, ніж CdO, зменшує ерозію
	MnO	Підвищує точку інверсії, підвищує опір до зварювання
IrO <sub>2</sub>	Те ж	
-	MgO	Подавляє рекристалізацію до 840°C
	PbO <sub>2</sub>	Те ж
	SnO <sub>2</sub>	Підвищує ерозійну стійкість і подавляє окалиностійкість
	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Підвищує опір до зварювання, понижує точку інверсії
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Підвищує опір до зварювання, понижує точку інверсії
	Li <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Підвищує опір до стирання
	SbO	Підвищує ерозійну стійкість

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
	SnO <sub>2</sub> , WO <sub>3</sub>	Підвищує ерозійну стійкість, стійкість до зварювання, характеризуються температурною стабільністю
	SnO, InO, NiO	Підвищує ерозійну стійкість
Ag-W	Ni, Co, Cu	Покращує технологічні властивості, підвищує електроерозійну стійкість, опір до зварювання
Ag-Mo	Ni, Co, Cu	Те ж
Ag	Wc	Підвищує ерозійну стійкість, зносостійкість, подавляє схильність до зварювання
	Mo <sub>2</sub> C	Те ж
	C	Підвищує зносостійкість
	Mo <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	Підвищує зносостійкість на повітрі і у вакуумі
	Si, Ir	Підвищує твердість і опір до приварювання
Ag-Pd	CaF <sub>2</sub>	Підвищує зносостійкість на повітрі і при підвищеній температурі
	Ni	Підвищує зносостійкість, механічну стійкість
	Au	Підвищує корозійну стійкість
	Ni <sub>3</sub> C	Підвищує зносостійкість
	Ni	Підвищує зносостійкість, механічну стійкість
	C	Підвищує зносостійкість
	CaF <sub>2</sub>	Підвищує зносостійкість на повітрі і при підвищеній температурі(до 400°C
Cu-Au	Sn, Te, Sr, Zr	Висока зносостійкість
	Cr, Sn, Zn, V	Висока зносостійкість
	Si, Sb, Mo	Висока зносостійкість
	Ni, Al, Ya, Mn	Висока зносостійкість і стабільний контактний опір
	Co, Sn, Ti <sub>5</sub> Pb	Підвищує жароміцність, стійкість до схватування

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
	Sb, Te, Mo, Pb, Se, As, Zn	Висока зносостійкість
	Ni, Sn, In	Підвищує зносостійкість, стабілізує контактний опір
	Ta, W, V	Підвищує зносостійкість, високий опір до зварювання
	Zn, La, W, V	Висока зносостійкість
	Si, Zn, Ya, Bi, Fe	Висока зносостійкість
	Zn, Co, Ti	Висока зносостійкість, стабільний і низький контактний опір
	Co, Sn, Ti	Підвищує зносостійкість, опір до зварювання
	Sb, Si, Ya	Підвищує зносостійкість
Cu-Ag-Pd	Co, Zn, Ti	Підвищують твердість і опір стиранню, володіють низьким і стабільним контактним опором
	Si, Ir, Ni(CoFe)	Підвищують твердість і опір до приварювання
Au-Pd-Pt	Al, Mn, Ni, Si	Підвищує температуру рекристалізації і опір до зварювання, поліпшує зносостійкість
	Co, Sn, Ti	Те ж
Ag	Sn, Si, Bi, Ya, Fe	Підвищує властивості міцності, ерозійну стійкість
	Zn, In, Sn, Cr	Підвищує зносостійкість, ерозійну стійкість
	Mn, Al, Cr, As, V	Підвищує ерозійну стійкість
	Sb, Ti, Tl, Ir	Те ж
	Zn, Sb	Підвищує зносостійкість
	Ya, Sb	Те ж
	Zn, Sb, Mo, Se, As	Те ж
	Cu, Sb, Te, Mo, Se, Sn	Те ж

Продовження таблиці 1.1

	Yb, Mn, Ir, Bi, Be, Al, Mg, Sb, Zn, Cd	Те ж
	BaCO <sub>3</sub>	Підвищує теплостійкість, ерозійну стійкість, опір до зварювання
	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Підвищує стійкість до зварювання
	ZnO	Те ж
	ThO <sub>2</sub>	Підвищує твердість, зменшує дугову ерозію
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Підвищує твердість, зносостійкість
	γ <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Те ж
	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Підвищує ерозійну стійкість, опір до зварювання
	Hf <sub>2</sub> O	Те ж
	CdO, Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Підвищує стійкість проти зварки до 2000А
	CdO, In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Підвищує стійкість проти зварки до 2000-3000А
	MgO, In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Підвищує ерозійну стійкість, створює отдувний ефект аналогічний CdO, але не вміщує токсичного Cd
	CdO, In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Li <sub>2</sub> O <sub>3</sub> активізує процес спікання, понижує ерозію при включенні
	CdO, NiO	Підвищує ерозійну стійкість і опір до залипання
	CdO, LaO <sub>2</sub>	Підвищує ерозійну стійкість і опір до залипання
Cu	BaN, TiN, CaN	Підвищує ерозійну стійкість і опір до зварювання
	WC	Те ж
	MoC	Те ж
	W, Mo, Fe, Ta	Понижують ерозійну стійкість і понижують опір до зварювання
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CdO, ZnO, TiO	Підвищує ерозійну стійкість і подавляє опір до зварювання
	Cr, Zr, Mg, Pd	Подавляє окислюваність міді і підвищує ерозійну стійкість, понижають схильність до зварювання

## Продовження таблиці 1.1

1	2	3
	Bi, Te, Pb, Zn, Sb	Зменшує силу зварюваності контактів і струм зрізу
	Bi, Sb, Ya	Зменшує струм зрізу
	Fe, Sn	Знижує ерозію
	Al	Підвищує корозійну стійкість, рекомендується вводити до 10%
Cu-Ag	Al, Ya, Mn, Ni	Висока жароміцність
	Zn, Ya, Mn, Ni	Матеріал має низький і стабільний опір
	Mn, Sb, Sn, Ti, Zr, P	Висока зносостійкість
	Sb, Ti, Tl, In, Zn	Висока зносостійкість, низький і стабільний опір
	W, V, Ta	Попереджують схватування, підвищують зносостійкість
	Nb, In, Ba, Cd	Підвищують зносостійкість
	Al, Ya, Mn, Ni	Підвищують стійкість до зварювання
Cu-Ag-Au	Nb, In, Ba, Cd	Підвищують зносостійкість
	Zn	Підвищують зносостійкість при низькому і стабільному контактному опорі
	Bs, Ya, Te	Те ж
	Mg, Cr, Zr, P	Високий опір до зварювання і висока зносостійкість
	Al, Ya, Ni, Mn	Те ж
	Fe, Ni, Co	Висока твердість і стійкість до стирання
	Co, Sn, Ti	Низький і стабільний контактний опір при високій зносостійкості
	Cr, Mg, Ir, P	Висока температура розм'якшення, високий опір до зварювання
	Zn, Ta, W, V	Стабільний контактний опір, підвищують опір зносу
	Zn, AsYa, Mg, Ni	Те ж
	Si, YeH, Ni, B	Відрізняється високою зносостійкістю
Ni, Al, YaMn	Відрізняється високою зносостійкістю і низьким і стабільним контактним опором	

матеріалами різного функціонального призначення: робоче, для дугогасіння, для зниження зрізу струму тощо.

Принциповими елементами технології виробництва електроконтактних матеріалів методами порошкової металургії є:

1. Одержання порошків необхідного хімічного, гранулометричного складу.
2. Формування з цих порошків заготовок відповідного розміру і форми.
3. Перетворення заготовок в практично безпористі вироби шляхом температурної обробки в контрольованих газових середовищах (відновлюючому, нейтральному) або в вакуумі, при цьому здійснюється твердофазне або рідкофазне спікання, просочення рідким металом пористої шготовки з подальшим спіканням.
4. Формування кінцевих розмірів, форми і структури тієї чи іншої операції механічної обробки.

В окремих випадках використовують методи високотемпературного імпульсного або статичного пресування і ізостатичного пресування. Використання сил міжмолекулярного зчеплення на стадії пресування порошків, явищ в'язкої текучості і капілярних ефектів (поверхневих сил, змочування, капілярного тиску) і дифузії, на стадії твердофазного або рідкого спікання і пропитай, дозволяє в одному матеріалі об'єднати різні фазові складові широкого кола речовин. Підбір початкової структури частин порошків або армуючих елементів і вибір відповідного варіанту технології виробів дозволяє забезпечити необхідну структуру матеріалу по дисперсності та розподілу фазових складових, що забезпечує їх високі електроконтактні властивості. Кожний клас електроконтактних матеріалів (високовольтні, низьковольтні, контакти для середньо і слабонавантажених апаратів) виготовляють за певними технологічними схемами. Оптимальним технологічним варіантом виготовлення контактів для високовольтних і низьковольтних апаратів є метод просочення спеченого пористого тугоплавкого каркасу.

Загальною вимогою при синтезі електроконтактного матеріалу є те, що він повинен представляти собою псевдосплав, який складається з тугоплавкої твердої жароміцної і дугогасної компоненти, яка утворює просторовий каркас-матрицю, і відносно легкоплавкої, електропровідної і теплопровідної компоненти, яка є наповнювачем, що заповнює всі пори. Першою умовою надійності роботи такого псевдосплавного матеріалу є його монолітність відсутність пористості та висока міцність адгезійного зв'язку. Це забезпечується відповідними технологічними умовами виготовлення:

введенням домішок, які сприяють зниженню крайового кута змочування, підвищенню капілярного тиску і міцності адгезійного зв'язку. Тонко дисперсні інертні наповнювачі, які обмежують спікання поверхневих шарів иористої тугоплавкої заготовки, покращують доступ просочуючого розплаву і його рівномірне розгінання по каналах пор в об'ємі заготовки.

Оптимальна для цього псевдосплава буде мікроструктура, яка утворена рівномірним по всьому об'єму контакту безперервним каркасом із тугоплавкої складової в матриці з легкоплавкого компоненту або сплаву. Легкоплавкими компонентами звичайно служать мідь, срібло та їх сплави.

Контактні деталі з псевдосплаву на основі вольфраму, молібдену, карбїду нольфрама або карбїду молібдена для забезпечення приварки або пайки повинні мати иідшар із міді або срібла. Для покращення тепловідводу від робочої поверхні утворений шар лугостійкого псевдосплаву товщиною 4 – 5 мм. Така комбінована деталь володіє в 5 раз більшим строком служби, ніж виготовлена тільки із Порошкового псевдосплаву [35].

Для низьковольтної апаратури найчастіше використовують матеріали на основі срібла або міді з добавками оксидів (Cd, ZnO, SnO, MgO, NiO тощо) [28]. Найбільш оптимальною мікроструктурою цього типу є рівномірний розподіл в матриці компонентів, які добавлені, у вигляді окремих включень або ланцюжків, що відіграють роль дисперсно-керуючих домішок і в той же час виступають у ролі теплопоглинаючих складових, які проявляються в процесі термічного розкладу.

Виготовляються ці матеріали твердофазним спіканням пресованих із суміші порошків компонентів з подальшою деформацією.

Змінюючи технологію виробництва можна отримати контакти з різною мікроструктурою. Розміри включень оксиду металу змінюються від десятих долей до 10 – 50 мкм. Дисперсні структури можна одержати використовуючи твердофазне спікання пресовок із суміші порошків, які одержані спільним осадом з подальшою деформацією або відливкою сплаву срібло-метал з подальшим внутрішнім окисленням металу [39].

В табл. 1.2. показано вплив технології виготовлення електричних контактів на їх властивості.

Електричні контакти з більш високою дисперсністю є менш пластичні, вони мають суттєві переваги по електроерозійній стійкості перед литими і перед спеченими контактами більш крупнозернистої будови.

Технологія виготовлення слабострумових контактів складається з пресування заготовок суміші певного складу та спікання. Після цього заготовки



піддаються механічній деформації: прокатка, волочіння. Ефективним шляхом усунення остаточної пористості є холодне і гаряче екструзування і гаряче або ізостатичне пресування.

Таблиця 1.2

**Порівняльні електроерозійні характеристики контактних матеріалів, отриманих литтям і методом порошкової металургії**

№ п/п	Склад	Метод виготовлення	Зміна маси електродів за 1 цикл, мг $10^{-3}$	
			анод	катод
1	Срібло / 99,99 %	Лиття	+4,9	-3,2
2	Срібло / 99,99 %	Порошкова металургія	-1,5	-0,17
3	Срібло-паладій (Ag 70 % Pb 30 %)	Лиття	+1,8	-2,2
4	Срібло-паладій (Ag 70 % Pb 30 %)	Порошкова металургія	+0,2	-0,3

Мікроструктура таких матеріалів представляє електропровідну і теплопровідну матрицю, в якій рівномірно розподілені добавки.

Останньою операцією механічної обробки тиском забезпечують створення анізотропної структури псевдосплаву, одержання волокнистої будови з виходом волокон мікрофаз до робочої поверхні контакту, що суттєво впливає на режим роботи контактів та його електропровідність в даному напрямку, ерозійну і механічну стійкість.

Із одержаного прокату проволоки або стрічки шляхом штамповки і висадки можна одержати контакти будь-якої складної форми і розмірів. В деяких випадках висадку контактів із проволоки проводять одночасно з їх кріпленням до контактотримача.

Таблиця 1.3

**Властивості срібно нікелевих контактів, виготовлених різними методами  
та з різних вихідних порошків**

Склад		Спосіб виготовлення	Твердість	Питомий електричний опір $\rho$ , мк·Ом·мм	Зміна маси електрода за 1 цикл $1 \cdot 10^{-3}$ мг
Ag	Ni				
70	30	Пресування суміші порошків Ag і Ni (величина зерна 30 $\mu$ ) спікання і допресовка	60	0,025	20 – 25
70	30	Пресування тієї ж суміші з подальшим спіканням, прокаткою та волочінням	110	0,024	5 – 10
70	30	Пресування заготовок із суміші порошків, виготовлених хімічним змішуванням з подальшою деформацією, прокаткою і волочінням	110	0,024	5 – 10

## 2. ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ КОМУТАЦІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ТА КОНТАКТНИХ СИСТЕМ

### 2.1 Низьковольтні електричні апарати

Потреби технічного прогресу призводять до збільшення номенклатури електротехнічних пристроїв, електричних апаратів та інших систем. В даний час немає жодної галузі, де б не використовувалися електричні апарати, що виконують функції захисту, управління та комутації електричних кіл [1 – 10].

Конструкції електричних апаратів умовно поділяються на два великі класи: контактні та безконтактні [8, 9]. Найпоширенішими як у нас в Україні, так і за кордоном є контактні комутаційні електричні апарати, такі як автоматичні вимикачі, електромагнітні контактори (рис. 2.1,а – 2.2), командоапарати та ін., які переважно приймають та розподіляють всю силову навантаження енергосистем.

Враховуючи таку необхідність у низьковольтній електричній апаратурі, перед дослідниками стоїть питання її постійного оновлення. Пошук нових рішень дає можливість зменшення габаритних розмірів електричних апаратів, поліпшення параметрів та характеристик спрацьовування шляхом створення нових матеріалів для контактних, магнітних, струмопровідних тощо. систем.

Основним вузлом комутаційних електричних апаратів є контактна система (рис. 2.1, б), що визначає надійність роботи як самих електричних апаратів, а й електричних ланцюгів енергосистеми.

Комутаційні електричні апарати постійно працюють у напруженому режимі увімкнення – відключення електричних навантажень [10, 11, 16 – 20]. Відповідно їхня контактна система повинна відключати як номінальні струми, так і струми короткого замикання та перевантажень (рис. 2.1 – 2.2).

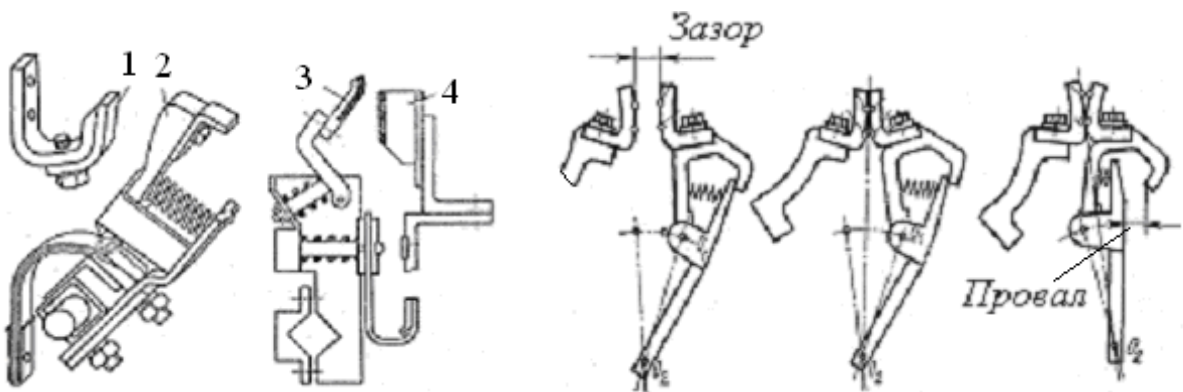
Робота автоматичних вимикачів пов'язана з витримкою певних струмів коротких замикань (КЗ) або відключенням ділянок з КЗ.

За таких режимів автоматичні вимикачі повинні залишатися в робочому стані.

У момент проходження струмів КЗ через електричні контакти змінюються значення струму та напруги, а також зростають електродинамічні сили, що призводять до несвоечасного розмикання електричних контактів. При розмиканні електричних контактів час відключення автоматичного вимикача починається вже з моменту початку короткого замикання до моменту



а)



б)

Рисунок 2.1 – Конструкції електричних апаратів (а) та основні типи контактних систем (б)

1, 3 – рухомі контакти; 2, 4 – нерухомі контакти;

зазор, провал – параметри, що визначають зношування контактів

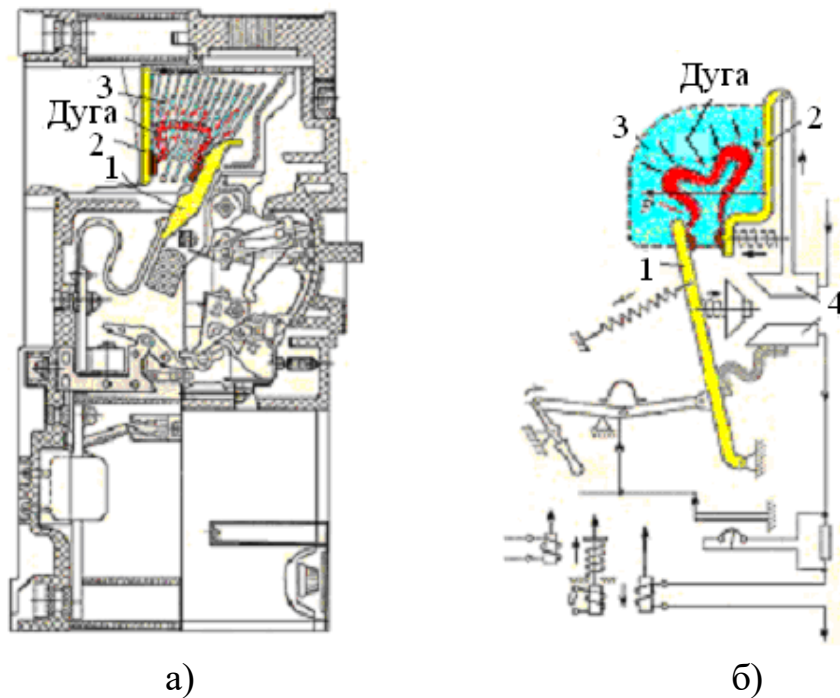


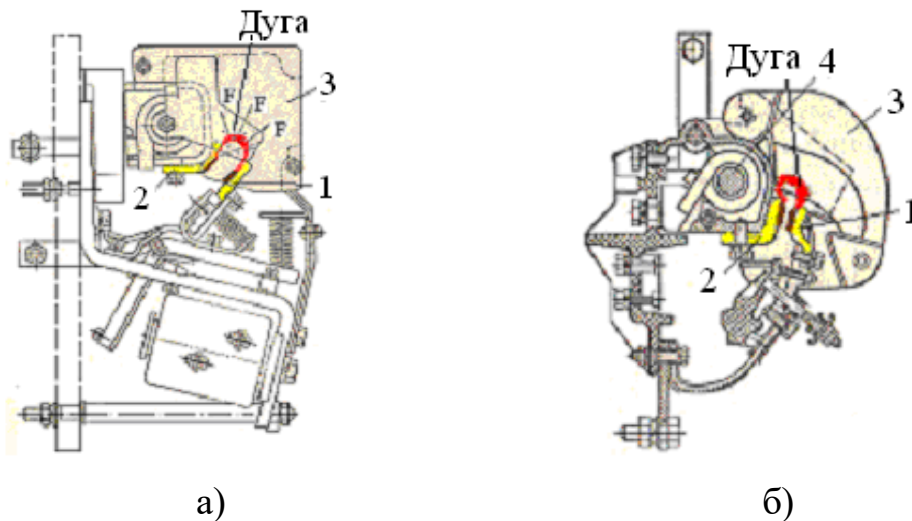
Рисунок 2.2 – Конструкції автоматичних вимикачів до 1000 А (а) та структурна схема багатоамперного автоматичного вимикача (б);

1; 2; 4 – рухливий, нерухомий контакти; основні контакти (б)  
3 – дугогасна система;

розходження електричних контактів, включаючи час горіння електричної дуги в міжконтактному проміжку. Процес відключення досить складний і повинен проходити за мінімальний час, щоб уникнути аварійної ситуації [9, 14, 20]. Такий процес відключення характерний для автоматичних вимикачів на струми до 1000 А та для багатоамперних вимикачів – понад 1000 А. Крім того, багатоамперні автоматичні вимикачі мають двоступінчасту контактну систему, яка містить головні та дугогасні контакти. Основне навантаження електричного кола сприймають дугогасні контакти.

Електромагнітні контактори (рис. 2.3) та подібні до них електричні апарати працюють у режимі управління, при якому відбувається часта комутація електричного ланцюга. При такому режимі роботи даних електричних апаратів, електричні контакти, природно, схильні як до механічного, так і електричного зношування [5, 8, 9], який супроводжується виникненням електричної дуги в міжконтактному проміжку.

Виникнення електричної дуги та її розвиток викликає ерозію робочої поверхні контактів, що, призводить до розвитку аварійної ситуації.



а, б – контактори змінного та постійного струму;

Рисунок 2.3 – Конструкції електромагнітних контакторів

1; 2 – рухливий, нерухомий контакти; 3 – дугогасна система; 4 – котушка магнітного дуття

Таким чином, аналізуючи особливості роботи таких комутаційних електричних апаратів, як автоматичних вимикачів та електромагнітних контакторів, визначено, що надійність їх роботи залежить від контактних систем.

### 2.1.2 Напрями досліджень контактних систем

Контактна система (рис. 2.4), складається з контактоутримувача та контактної накладки. Для надійної роботи електричних апаратів до складу композицій контактних накладок (далі контакти) входять дорогі, дефіцитні, токсичні елементи та з'єднання.

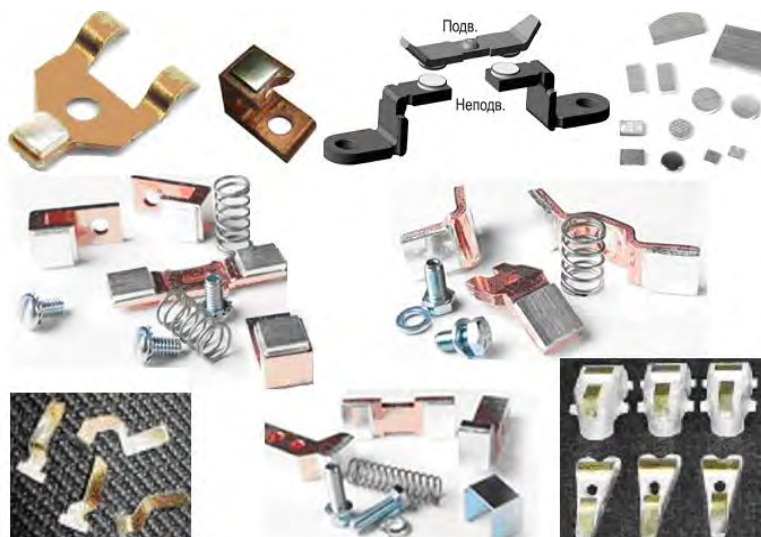


Рисунок 1.4 – Конструкції контактних систем електричних апаратів

В даний час, в контактах електричних апаратів застосовуються, наприклад: паладій, платина, срібло, мідь, нікель, вольфрам, окис кадмію, ртуть та ін [21]. Джерелом постачання таких елементів, переважно, закордонні держави. Тому в Україні дуже гостро стоїть питання про економне їхнє розподілення та використання.

Найбільш широко, в електричних апаратах з дуговою комутацією струму застосовуються контакти, виготовлені способом порошкової металургії, які називаються композиційними складами [22 – 28]. Застосування композиційних складів (матеріалів) почалося ще 30<sup>ти</sup> роки. З цього моменту також почалося їх застосування в електротехнічній промисловості та, зокрема, у конструкціях контактних систем електричних апаратів. Даний спосіб виготовлення контактів сприяє створенню композицій, що складаються з металевих порошків, які поєднують необхідні властивості, неможливі отримати при їх сплавленні. Найпоширенішими композиціями електричних контактів, які визначаються ГОСТ-19725 [21], є, наприклад: срібло-нікель (КМК А30м), срібло-окис кадмію (КМК А10м), срібло-графіт (КМК А41м) тощо (де “м” – дрібнодисперсна структура композиції контактів). Найчастіше у контактних системах комутаційних електричних апаратах застосовуються контактні пари: КМК А30м/КМК А10м (рухливий/нерухомий);

Як правило, основними вимогами до таких складів композицій електричних контактів є висока температура плавлення, висока твердість, висока дугостійкість, висока гранична комутаційна здатність (ГКЗ) [16, 19], зносостійкість комутацій та ін.

Кожна з композицій електричних контактів має свої переваги та недоліки. Це значною кількістю параметрів, яких залежить подальша робота контактних систем. До них відносяться:

- розмір контактних накладок;
- відсотковий вміст необхідних елементів у складах композицій електричних контактів;
- сумісність елементів, що входять до складу композицій електричних контактів;
- спосіб виготовлення електричних контактів;
- особливість руху дуги по робочій поверхні електричного контакту, час її існування та швидкість переміщення опорної точки;
- особливість конструкції дугогасного пристрою, а також способу та методу гасіння дуги;
- температура навколишнього середовища, у зоні горіння електричної

дуги та на робочій поверхні електричних контактів.

У всі часи дослідники всього світу прагнули отримання не дорогих складів композицій електричних контактів, але зі збереженням тих властивостей, які притаманні благородним металам. Тому постійно стоїть завдання створення таких контактних композицій для комутаційних електричних апаратів, які відповідали б усім вимогам контактного з'єднання, не мали дорогих, токсичних і рідкісних елементів. Крім того, важливу роль відіграють параметри та характеристики контактних з'єднань, що призводять до зменшення габаритів, матеріаломісткості та вартості всього електричного апарату.

Звичайно, всі ці вимоги підходять тільки до ідеальної конструкції електричного апарату та його контактної системи. А якщо подивитися з точки зору реальної роботи комутаційних електричних апаратів, то можна поліпшити ті чи інші параметри, щоб досягти деяких пунктів певних вимог, які до них пред'являються [8, 11, 16].

Основним явищем, що руйнує контактну робочу поверхню, є ерозія електричних контактів. Це питання було актуальним, і дослідники вирішували його у різний спосіб [29 – 34].

Поняття ерозії робочих поверхонь електродів виникло з кінця ХІХ століття з розвитком досліджень процесів в електричних розрядах, результати яких були опубліковані відомими вченими Шоттка, Фаулер, Ленгмюр тощо. Більш глибоке вивчення ерозійних явищ почалося з 30<sup>x</sup> – 50<sup>x</sup> років, де використовувалися систематизовані методи із залученням теоретичних та експериментальних досліджень. Основний внесок у вивчення розвитку ерозійних явищ на робочій поверхні електричних контактів при їх замиканні та розмиканні внесли відомі вчені А.А. Таєв, В.В.Усов, О.Б. Брон, Г.В. Буткевич, В.Т. Омельченко, К.К. Намиток.

Останнім часом для комутаційних (сильноточних) електричних апаратів одним з основних напрямків циклу робіт з вивчення ерозійних та інших процесів, що відбуваються як на поверхні електричних контактів, так і в дуговому стовпі електричної дуги, що виникає при розходженні електричних контактів, є:

- визначення теплового режиму за стаціонарних, квазістаціонарних та нестаціонарних умов розподілу температурного поля на робочій поверхні електричних контактів;
- розвиток локального перегріву зон на робочій поверхні, які залежать від стягування ліній струму.



Через війну таких досліджень, переважно, визначається перехідний опір у зоні контактування при нагріванні робочої поверхні контактів.

Іншим напрямом робіт є встановлення залежності розплавленої зони на робочій поверхні електричних контактів від [11]:

- протікає струму;
- теплофізичних параметрів та властивостей складів композицій електричних контактів;
- кінематики руху електричних контактів при їх розмиканні.

У будь-якому випадку всі напрямки робіт пов'язані з розвитком дугового розряду на робочій поверхні електричних контактів та руйнуванням поверхні під дією різних процесів, що протікають. Будь-які процеси та явища призводять до утворення катодних або анодних плям на поверхні, які, зрештою, переростають в осередки руйнування робочої поверхні електричних контактів [35–41].

Відповідно, на робочій поверхні відбуваються різні фізико-механічні, фізико-хімічні, структурно-фазові перетворення, в результаті яких утворюються різного виду з'єднання, що визначають подальшу роботу електричних контактів.

Постійні дослідження ерозійної стійкості електричних контактів призводять до різних рішень. На жаль, не всі рішення є ефективними. Так,



Рисунок 2.5 – Процеси на робочій поверхні контактів

наприклад, у роботах [31, 32], показані особливості складів металокерамічних композицій контактних пар електричних контактів срібло-окис кадмію, срібло-вольфрам ( $\text{Ag/CdO}$ ,  $\text{Ag/W}$ ) та ін, які дуже відрізняються за температурою кипіння складів композицій і інших ознак.

Наприклад, металокерамічні композиції електричних контактів, що складаються з  $\text{Ag/CdO}$ , сприяють утворенню області пари (рис. 2.5), що перешкоджає проходженню струму через низьку температуру.

Наприклад, металокерамічні композиції електричних контактів, що складаються з  $\text{Ag/CdO}$ , сприяють утворенню області пари (рис. 2.5), що перешкоджає проходженню струму через низьку температуру.

Все це ускладнює рух дуги і, природно, вона може перебувати в точці поверхні, що контактує певний час, але це призводить до утворення розплавлених зон, що визначають і характеризують ерозію робочої поверхні електричних контактів.

Автори даних робіт стверджують, що утворення пари перешкоджає

розбризуванню складу композиції електричних контактів, що сприяє зменшенню зносу їхньої робочої поверхні. Але, на жаль, з таким висновком важко погодитися з тієї причини, що якою б гарною не була дана композиція контактів, але вона містить токсичну сполуку – окис кадмію (CdO), пари якого шкідливо впливають на навколишнє середовище при експлуатації електричних контактів. Саме цей факт призвів до відмови виробництва таких контактів та їх використання у країнах Європи. На жаль, Україна продовжує використовувати такі композиції контактів, що знижує їх конкурентоспроможність та комутаційних електричних апаратів.

Для зменшення ерозії робочої поверхні електричних контактів використовують різні способи. Багато авторів, проводячи різні експерименти, намагаються пояснити своєрідні особливості, характерні для складів композицій електричних контактів комутаційних електричних апаратів, які виготовляються та застосовуються у різних середовищах.

Наприклад, у роботі [35] показані композиції електричних контактів, таких як мідь-хром (Cu-Cr) та вольфрам-мідь (W-Cu), експлуатація яких проходила в захисному середовищі водню (H) та інертних газів, таких як гелій (He), аргон (Ar). Дослідження проводилися з різним поєднанням складів контактних композицій та захисного середовища. Завданням дослідження було визначення контактного опору при випробуваннях на нагрівання, що дало дуже хороші результати, так як застосування вольфраму призводить до підвищення перехідного опору. У процесі досліджень було також виявлено недостатню відключаючу здатність електричних контактів (значення, на межі критичних).

В роботі [42] Дослідження контактної композиції вольфрам-мідь-сурма (WCuSb) показало незадовільні результати на комутаційну зносостійкість у захисному середовищі аргону (Ar), що викликало значну ерозію робочої поверхні. Але цим недоліки цієї композиції не обмежуються. Як показали дослідження, відбувається швидке старіння складу композиції контактів та, крім того, застосовується дуже дорога технологія їх виготовлення.

Таким чином, як видно з показаних робіт, застосування таких композицій у контактних системах призводить до зменшення ерозії їх робочих поверхонь, але проблему вирішити не вдається. Крім того, до кожної конкретної номенклатури електричних апаратів необхідний ретельний вибір елементів, що входять до складу композицій електричних контактів.

## 2.2 Процеси у міжконтактному проміжку, що визначають ерозію робочих поверхонь електричних контактів

### 2.2.1 Причини розвитку ерозії поверхні контактів

Джерелом енергії, що викликає ерозію робочих поверхонь електричних контактів, є процеси, що відбуваються в приелектродних областях. Більшість прикладних досліджень присвячується прикатодній області, так як саме ця область і є основним постачальником заряджених частинок (електронів) у середу, в якій горить електрична дуга, а також відбувається перехід від високотемпературної плазми до робочої поверхні електричних контактів.

Аналізуючи розвиток процесів, що призводять до ерозії робочих поверхонь електричних контактів, деякі автори [10, 14, 16, 43, 44] показують, що прианодні процеси також впливають на знос поверхні електричних контактів, але меншою мірою. Це тим, що щільність струму на аноді значно менше.

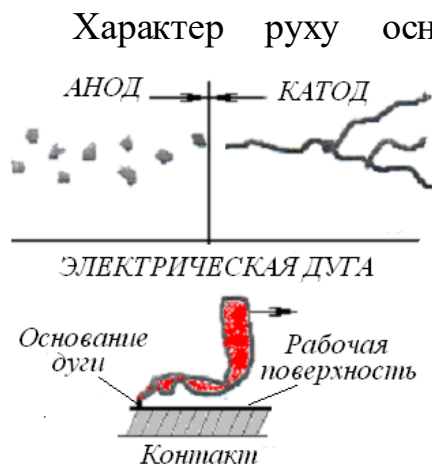


Рисунок 2.6 – Розподіл основи електричної дуги на робочих поверхнях контактів

Характер руху основи дуги по робочих поверхнях контактів неоднакових (рис. 2.6), а саме, катодні плями переміщуються по поверхні безперервно і при збільшенні струму поділяються на ряд паралельних гілок, а анодні плями – рухаються стрибкоподібно. Але це може бути не зовсім так. Деякі автори [10, 45, 46] вважають, що анодні процеси вивчені ще менше, ніж катодні і більше, у деяких складах композицій контактів спостерігається значна ерозія саме анода електричного контакту, а не катода.

Причини ерозії робочих поверхонь електричних контактів і, як наслідок, прояв небажаних процесів, супроводжуються різними явищами на початку виникнення електричного, дугового розряду, руху електричної дуги та її подальшому розвитку, з урахуванням потоків плазми, що виникають. Всі ці процеси взаємопов'язані між собою і значно впливають один на одного.

Численними дослідженнями [9, 11, 49] встановлено, що з розвитком дугового розряду відбувається утворення катодних плям на робочій поверхні контакту катода. Це з неоднорідністю складу композицій електричних контактів і нерівномірним, котрий іноді неодноразовим контактуванням робочих

поверхонь контактних пар (рис. 2.7, а), що зумовлює плавлення ділянок контактування.

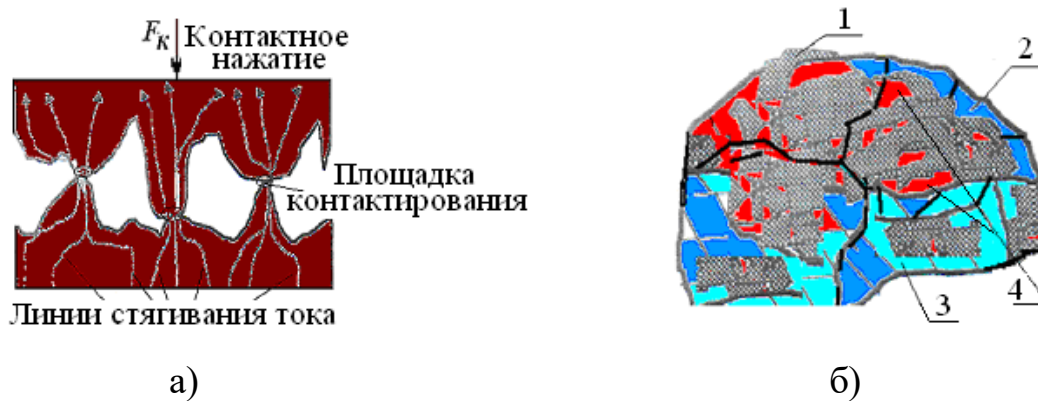


Рисунок 2.7 – Контактируючі робочі поверхні (а) та загальний вигляд робочої поверхні електричних контактів (б) [9]:

1 – склад композиції електричних контактів; 2 – адгезійні плівки; 3 – окисні плівки; 4 – катодні плями

Поверхня контакту має значні нерівності, у результаті контактування відбувається у певних точках. При цьому в місцях контактування за рахунок ліній стягування струму (рис. 2.7, а) відбувається зміна перехідного опору контактів, яке залежить від опору стягування струму в місцях контактування і опору плівок, що утворюються на робочій поверхні контактів (рис. 2.7, б ) [10, 55, 56].

Утворення катодних плям на робочій поверхні електричних контактів пов'язане з тим, що елементи складів композицій мають різну роботу виходу, яка пояснюється різною щільністю упаковки атомів у гранях кристалічної будови і між ними виникає контактна різниця потенціалів, що створює над поверхнею поле плям, що змінюється за певним законом [50 – 54].

Катодні плями, на думку дослідників [39 – 41, 46, 54], існують I – III роду та в міру підвищення температури, сприяють утворенню розплавлених ділянок робочої поверхні катода електричних контактів, що у свою чергу призводить до перенесення складу композиції з одного контакту на інший, для його розбризкування при подальшому контактуванні або зварюванні контактних пар.

Тому, щоб не відбувалося перелічених вище явищ, необхідно прагнути утворення на робочій поверхні катодних плям I роду, які призводять до рівномірного зносу і незначної ерозії робочих поверхонь, як катода, так і анода.

Іншою особливістю дугового розряду є утворення ділянок з різним покриттям та кольорами втечі (рис. 2.7, б) на робочій поверхні електричних контактів, які залежать від елементів, що застосовуються, у складах композицій

електричних контактів.

При розходженні електричних контактів і виникненні електричної дуги, на контактну поверхню потрапляють як продукти горіння зон електричної дуги і плазми, а й з'являються продукти обгорання поруч поверхонь, що знаходяться поруч. В результаті на робочій поверхні утворюються плівки різного походження, які також сприяють розвитку ерозійного процесу або навпаки його уповільнення. Крім того, на робочій поверхні електричних контактів, зустрічаються ділянки із втратою провідності електричного струму, що призводить до підвищення перехідного опору контактів.

У процесі роботи електричних контактів майданчик контактування видозмінюється аж до утворення неправильної форми, відповідно, змінюються ділянки контактування, що знаходяться на робочій поверхні.

У складному комплексі робіт електричних апаратів значне місце займає процес виникнення дуги при розмиканні електричних контактів. Збільшення відстані між електричними контактами під впливом магнітного поля відбувається переміщення анодного потоку. Досягши катода електричного контакту, анодний потік утворює на робочій поверхні електричного контакту катодна пляма, що переміщується, викликаючи ерозію [9 – 11].

Аналізуючи всі показані процеси, визначено характерні причини розвитку ерозії на робочій поверхні електричних контактів, які можна класифікувати як [14, 15, 17, 45]:

– по протіканню процесів, (теплової дії; фізико-хімічних процесів, що призводять до агрегатних перетворень та структурних змін, несумісність елементів складу композиції тощо), що відповідає неправильному вибору елементів для складів композицій електричних контактів за енергетичними параметрами;

– за конструктивним виконанням (не відрегульовані розчин, провал, контактне натискання; неефективна дугогасна система або умови дугогасіння; зміщення робочих поверхонь рухомого та нерухомого контактів; не відрегульована одночасність дотику рухомого та нерухомого контактів у полюсах електричного апарату тощо).

Ці причини сприяють:

- а) підвищення перехідного опору електричних контактів;
- б) випаровування складу композиції контактів під дією енергії, що виділяється на контактах або в стовпі дуги;
- в) розбризкування складу композиції контактів в результаті прискореного плавлення, а також утворення вибухових процесів та виділення

газів;

г) утворенню кратероподібних слідів ерозії на поверхні електричних контактів за рахунок неміцних та недугостійких композицій або інших причин, що впливають на утворення такого виду ерозії;

д) зварювання електричних контактів, що може призвести до аварійної ситуації тощо.

Таким чином, основний внесок у руйнування робочої поверхні електричних контактів вносять процеси, що протікають на їхній робочій поверхні і в приелектродних областях, а саме, в прикатодній області. Швидкість зростання ерозії на поверхні катода електричного контакту знаходиться в тісному зв'язку із густиною струму, температурою катодної плями, утвореної на поверхні електричного контакту, падіння катодного потенціалу тощо.

Зношування та ерозія на робочій поверхні електричних контактів під дією дуги або механічного впливу, у багатьох випадках, обмежують термін служби контактних систем та комутаційних електричних апаратів в цілому.

### **2.2.2 Розподіл температури на поверхні контактів**

Як було показано в п. 2.2.1, процеси, що розвиваються на робочій поверхні електричних контактів, а також дуговий розряд, що переходить в електричну дугу носять тепловий характер [26, 56 – 58]. А тому при їх розгляді вирішується ряд складних та важливих теплових завдань, наприклад:

- оцінка розмірів опорних точок електричної дуги на контактах;
- визначення залежності основних факторів, що впливають на знос і на розвиток ерозії робочих поверхонь електричних контактів;
- визначення температури основи дуги та закону її розподілу при зміні та охолодженні.

Процес утворення катодних плям та розподіл температури на поверхні електричного контакту, а також час ( $t$ ) та швидкість ( $V$ ) переміщення опорних точок дуги при певних електричних параметрах розглянемо з моделі (рис. 2.8).

Ізотерми мають краплеподібну форму (1 – 4), схожу на розплавлену поверхню. Розплавлений обсяг (1) поверхні електричного контакту розташований позаду теплового джерела (4). Такі форми ізотерм призводять до різного механізму руйнування робочої поверхні електричних контактів навіть за наявності різного виду магнітного дуття.

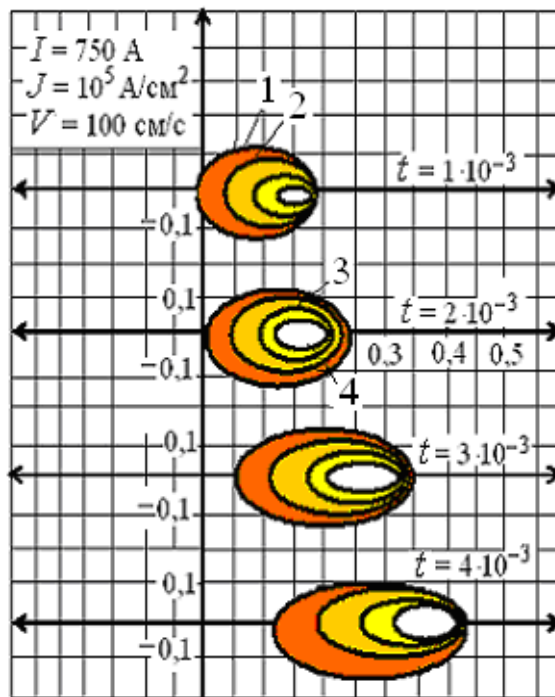


Рисунок 2.8 – Ізотерми на поверхні електричних контактів

Наприклад, у разі застосування повітряного дуття, зона ущільнення ізотерми знаходиться за дугою, що рухається. Максимальний обсяг ізотерми знаходиться в зоні турбулентності, що і призводить до видування та розбризкування складу композиції електричних контактів з поверхні.

За наявності магнітного дуття зона турбулентності охоплює невеликий обсяг розплавленої ділянки, а зона ущільнення знаходиться перед фронтом дуги. Тому, руйнування електродів електричних контактів, внаслідок

розбризкування компонентів композиції, буде незначним.

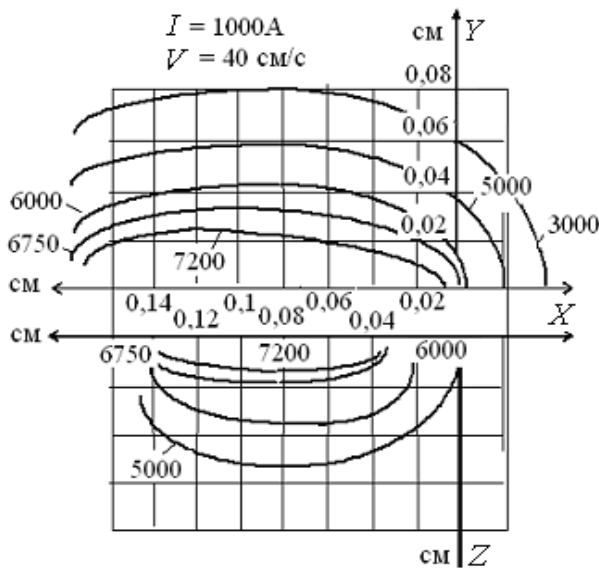


Рисунок 2.9 – Ізотерма на поверхні контакту (площина XY) та всередині контакту (площина XZ)

Численні експериментальні дослідження [29 – 31, 34, 36] підтверджують результати моделі розподілу теплового потоку, а саме, при великих швидкостях руху електричної дуги на поверхні контакту ізотерми мають витягнуту форму та різку асиметрію по відношенню до положення теплового джерела в кожний момент часу (рис. 2.9).

Виходячи з результатів дослідження, тепло, що знаходиться на робочій поверхні контакту та всередині

композиції, призводить до утворення площі з розплавленими ділянками.

Залежно від способу магнітного дугтя ефект видування складу з поверхні контактів збільшуватиметься або зменшуватиметься.

Тепловідведення та втрати на випромінювання визначаються за законом Стефана-Больцмана:

$$\frac{qIU_{\partial}}{2S} kgradT + \lambda_i G + \sigma T^4, \quad (2.1)$$

де  $q$  – тепловий коефіцієнт теплового потоку;  $U_{\partial}$  – падіння напруги на дузі;  $S$  – площа перерізу контактів;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура робочої поверхні електричного контакту;  $\lambda_i$  – прихована теплота випаровування складу композиції контакту;  $G$  – швидкість випаровування складу композиції контакту;  $\sigma$  – коефіцієнт пружності складу композиції контакту.

Математичний аналіз температурного поля [56 – 63] є нестационарним завданням, вирішення якого супроводжується певними математичними труднощами. Аналіз робіт показав, що немає загальної теорії, з досить повним описом явища розподілу тепла на поверхні катода електричного контакту, всередині контакту й у катодної області.

Таким чином, отримані результати визначення розплавлених ділянок дозволяють визначити лише конструктивні розміри контактів або спосіб дугогасіння, але зменшити зношування та ерозію робочої поверхні контактів повністю не вдається. Очевидно, тут необхідно шукати рішення з урахуванням деяких властивостей композицій складових електричних контактів.

### 2.2.3 Розвиток дугового процесу та його особливості

Визначення необхідних властивостей складів композицій електричних контактів необхідно розглядати з процесу, що впливає їх зміну.

Електрична дуга виникає в комутаційних електричних апаратах при розбіжності електричних контактів і є, за сучасними уявленнями [8 – 11, 14, 15, 43, 52, 63 – 68], низькотемпературною плазмою, яка має велику щільність струму та температуру. Для зменшення зносу контактних систем у комутаційних електричних апаратах застосовуються дугогасні пристрої або різні методи дугогашення.

Сам дуговий процес є іонізованим газом з концентрацією електронів  $n_e$  та їх температурою  $T_e$ , які значно перевершують величину так званого дебаєвського радіусу  $r_d = 5\sqrt{T_e/n_e}$ . При цьому концентрація електронів збільшується і утворюється електричне поле, здатне хіба що виштовхувати



надлишкові електрони у зону їх нестачі. За рахунок цього підтримується рівність концентрацій заряджених частинок (іонів та електронів), що визначає властивість квазінейтральності плазми [10, 11, 52, 65].

Виникнення та розвиток потоків плазми залежать від температури робочої поверхні електричних контактів, густини струму, а також енергії, що виділяється. За своєю структурою потоки плазми неоднорідні і мають велику теплову і механічну інерцію. Особливістю потоків є те, що за своєю інтенсивністю та яскравістю вони перевершують деякі ділянки електричної дуги, а також здатні змінювати форму та стан робочої поверхні електричних контактів. Ця особливість проявляється при розплавленні складу композиції електричних контактів. В результаті на робочій поверхні електричних контактів утворюються загострені виступи, які витягуються в напрямку руху потоків плазми.

На думку авторів робіт [9 – 11] розвиток дугового процесу ділиться на три основні області: навколокатодну, навколоанодну та стовп дуги. Вважається, що стовп дуги мало бере участь у ерозійних процесах так як у ньому відбувається рівномірний стаціонарний розвиток процесу. Однак процеси (іонізації, деіонізації) в дуговому стовпі впливають на стійкість дугового розряду і за допомогою цих процесів можна регулювати деякі параметри, наприклад час існування дуги, швидкість переміщення опорних точок електричної дуги по робочій поверхні контакту, утворення катодних плям різного роду та ін.

У комутаційних електричних апаратах розподіл температури по робочій поверхні носить досить складний характер. Найвища температура знаходиться на робочій поверхні у місцях звуження опорної точки дуги (рис. 2.10) [66 – 70].

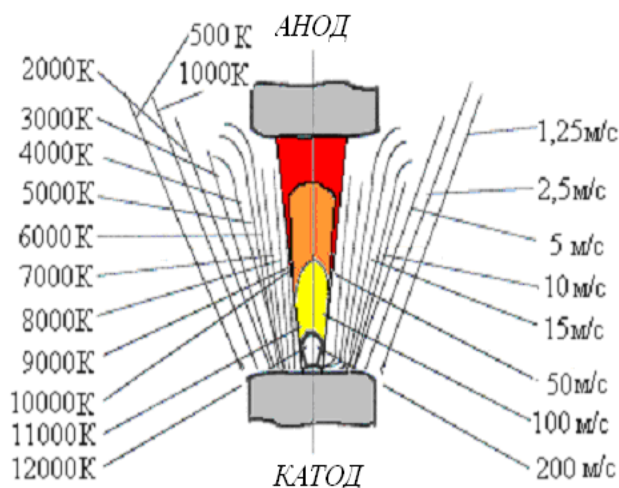


Рисунок 2.10 – Модель розподілу температури та швидкості потоку в електричній дузі

При розвитку дугового розряду нерухома опорна точка затримується у місці виникнення розряду через те, що реактивні сили не досягли значення певної величини, при яких починається її переміщення. І це веде до інтенсивної ерозії робочої поверхні електричних контактів [9 – 15].

Процес ерозії, пов'язаний із потоками плазми, протікає по-різному і залежить від складів композицій електричних контактів. При цьому потоки плазми, володіючи великою швидкістю, на своєму шляху захоплюють і забирають із собою продукти розкладання та випаровування складів композицій контактів [13, 16, 44, 69].

Чим більша швидкість переміщення опорних точок дуги, тим швидше відбувається утворення катодних плям різного роду і подальше їх розподіл робочої поверхні електричних контактів. Залежно від елементів, що входять до складу композицій електричних контактів та часу існування опорної точки дуги на поверхні розвивається ерозія.

Висока температура на поверхні катода електричного контакту визначає розподіл щільності струму у місцях контактування, а й у самому газовому розряді протягом його руху від катода до анода.

Що ж до розподілу швидкостей зарядів, у дуговому розряді, воно буде залежати від електромагнітних сил, які прагнуть стиснути електричну дугу і, від теплових процесів, що відбуваються робочої поверхні електричних контактів. У міру віддалення потоку від катода електричного контакту швидкість падає, а переріз збільшується.

Але, крім того, потоки плазми можуть впливати на тривалість протікання струму через дугу, форму дуги, що відбивається на характері її переміщення. Наприклад, проникнення пар складу в потоки плазми сприяє зниженню температури, що якраз і відбувається з композицією срібло-окис кадмію (КМК - А10м).

Така поведінка потоків плазми впливає на умови стійкості горіння або гасіння електричної дуги, що також призводить до різного виду електричного зносу контактних систем та розвитку ерозії на робочій поверхні контактів.

Таким чином, процеси в приелектродних областях забезпечують перехід від високотемпературної плазми (стовпа дуги) до робочої поверхні електричного контакту (катода) і зумовлюють високу інтенсивність ерозії катода, під дією якої катод електричного контакту, зрештою, перестає виконувати свої функції та руйнується.

Аналізуючи розвиток дугового розряду та подальше горіння електричної дуги, визначено, що ці процеси сприяють розвитку ерозії та руйнування робочої

поверхні електричних контактів, а також призводять до втрати працездатності інших систем електричного апарату.

Але електрична дуга грає і позитивну роль [9, 10, 64], наприклад, при відключенні ланцюга постійного струму  $I$ , який містить індуктивність  $L$ , відбувається накопичення електромагнітної енергії  $W_{em} = LI^2 / 2$ , яка повинна кудись витратитись при відключенні ланцюга електричним апаратом. Якби електрична дуга не виникала в міжконтактному проміжку, то ця енергія перетворилася б на електростатичну енергію поля, і пішла б на заряд ємності  $C$  електричного ланцюга з енергією  $W_{e\dot{n}} = CU_c^2 / 2$  та напругою на ємності  $U_c = I\sqrt{L/C}$ . Збільшення напруги призводить до перенапруження електричного ланцюга, що супроводжується пробоем ізоляції або неможливістю відключення ланцюга електричним апаратом.

Таким чином, електрична дуга, що виникає, акумулює у своєму стовпі теплову енергію, перетворюючи її в електромагнітну енергію ланцюга. При цьому теплова енергія розсіюється у навколишнє середовище.

Що стосується гасіння дуги на змінному струмі, то тут можуть виникати перенапруги, якби не було електричної дуги. Роль електричної дуги у тому, що вона забезпечує зв'язок від моменту розмикання електричних контактів до повного переходу струму через нуль, коли електромагнітна енергія стає рівною нулю. У результаті створюються сприятливі умови гасіння електричної дуги.

Таким чином, зіставляючи всі процеси, очевидно, що з одного боку, виникнення електричної дуги і тривалість її горіння негативно позначаються на роботі, як електричних контактів, так і всього електричного апарату в цілому. З іншого боку, електрична дуга є ніби перетворювачем енергії, обмежуючи перенапруги в електричному ланцюзі, які створюють аварійну ситуацію.

Тому необхідно шукати рішення підвищення дугостійкості електричних контактів, за рахунок збільшення швидкості переміщення опорної точки дуги робочої поверхні електричних контактів до моменту зникнення загрози появи перенапруг в електричному ланцюзі.

#### **2.2.4 Вплив магнітного поля на переміщення основи електричної дуги по робочій поверхні контактів**

Вплив магнітного поля викликає зміну форми електричної дуги та призводить до її переміщення у просторі. На такому принципі збудовані дугогасні пристрої комутаційних електричних апаратів.

Як показано в роботах [13, 44, 52, 69], розрізняють чотири основні види

руху дуги в магнітному полі: поперечне, поздовжнє, радіальне, власне вихрове поле. В основному, на переміщення дуги електродами електричних контактів в комутаційних електричних апаратах, впливає поперечне (рис. 2.11, а) або поздовжнє (рис. 2.11, б) магнітне поле.

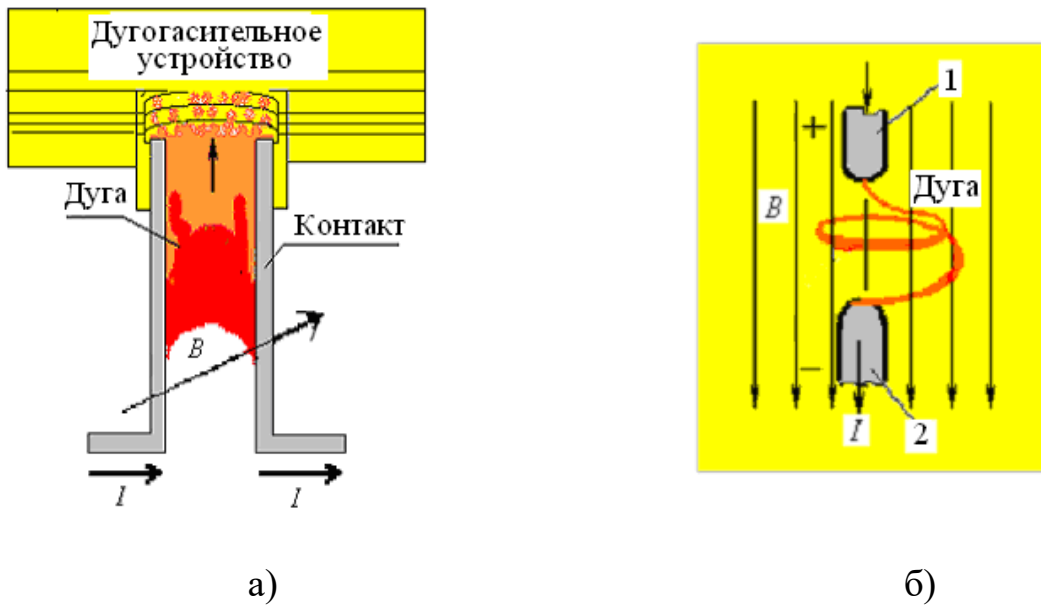


Рисунок 2.11 – Рух дуги у поперечному (а) та поздовжньому (б) магнітному полі (В) при проходженні струму (І) за контактам:

1, 2 – електричні контакти (анод «+», катод «-»)

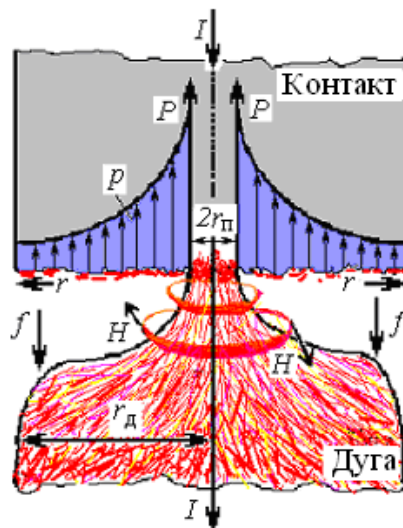


Рисунок 2.12 – Опорна точка дуги та її параметри

У поперечному магнітному полі дуга рухається поступально паралельним електродам електричних контактів під дією магнітного поля, перпендикулярного до стовпа дуги. Поток плазми призводить до відхилення дуги за рахунок дії магнітного поля. В результаті електрична дуга має

урирчастий характер руху та зміну форми, які сприяють утворенню нових опорних плям на поверхні електричних контактів.

При переміщенні дуги у поздовжньому магнітному полі напрямом струму  $I$  у дузі та магнітного поля  $B$  збігаються. Дане переміщення дуги дуже нестійке і пов'язане з появою двох потоків плазми, а саме анодного і катодного, які обертаються навколо осі. В результаті поле дуги змінюється під дією реактивних сил, що виникають в магнітному полі, і дуга згортається в спіраль.

Виникають потоки плазми впливають на розміри катодної плями, а саме зменшують його діаметр і збільшують величину реактивної сили, яка по всьому об'єму поверхні контакту визначається як:

$$F = \frac{\mu}{4\pi} I^2 \ln \frac{r_d}{r_p}, \quad (2.2)$$

де  $\mu$  – магнітна проникність середовища;  $I$  – струм стовпа дуги;  $r_d$  – радіус стовпа дуги;  $r_p$  – радіус опорної плями на поверхні контакту.

Але крім дії реактивної сили з боку магнітного поля на робочу поверхню електричного контакту, впливає тиск, який обумовлено дією магнітних силових ліній  $f$ , так званих “сил базового розпору“, так як потоки плазми складаються із зарядів, тому силова дія їх на електроди електричних контактів здійснюється через магнітне поле.

В результаті, вся поверхня (рис. 1.12) електричного контакту і, тим більше, катодна пляма дуги, відчують тиск, що визначається рівнянням:

$$D = \frac{\mu H^2}{2} = \frac{\mu I^2}{8\pi^2 x^2}, \quad (2.3)$$

де  $H$  – напруженість поля стовпа дуги;  $x$  – відстань від осі плями.

Тиск плями дуги змінюватиметься протягом усієї осі. Найбільшого значення тиск набуває за  $x = r$  (де  $r$  – радіус контактного майданчика), а надалі зменшується обернено пропорційно  $x^2$ .

Крім того, що магнітне поле впливає на розподіл силових ліній та тиск по поверхні електричного контакту, воно також впливає на розвиток приелектродних процесів. В результаті змінюється траєкторія руху заряджених частинок. Магнітне поле, впливаючи на переміщення частинок, повертає їх навколо силової осі і може повернути частинки назад на катод електричного контакту або стовп дуги.

Найбільший вплив магнітного поля проявляється при його розташуванні паралельно поверхні електрода електричного контакту. При цьому щільність

струму визначається як [52]:

$$j_e = \left[ j_{ek} - \frac{1}{4} en \bar{v}_e \exp\left(\frac{-eU_o}{kT_e}\right) \right] \cdot \chi_i(\beta), \quad (2.4)$$

де  $j_{ek}$  – густина струму емісії електронів з катода;  $e$  – заряд електронів;  $n$  – концентрація частинок;  $\bar{v}_e$  – середня швидкість електронів;  $U_o$  – падіння напруги емісійного шару частинок;  $k$  – постійна Больцмана;  $T_e$  – температура електрона;  $\chi_i(\beta)$  – функція, що визначає зниження струму;  $\beta = \omega\tau_e$  – релаксація електронів за імпульсом;  $\omega$  – циклотронна частота,  $\tau_e$  – час переміщення електрона.

Аналізуючи цю модель, очевидно, що магнітне поле впливає не тільки на розподіл магнітних силових ліній, які створюють тиск на робочій поверхні електричних контактів, а також на розвиток приелектродних процесів, внаслідок чого змінюється траєкторія руху частинок та форма потоків плазми.

Дані особливості магнітного поля необхідно враховувати при розробці контактної-дугогасної системи електричного апарату з урахуванням взаємодії з електричною дугою.

Деякі автори пропонують спеціальні пристрої або методи дугогасіння, які необхідні для різних конструкцій електричних апаратів. [8, 10, 44, 52].

Найпростіший спосіб гасіння електричної дуги – це її механічне розтягування. При цьому довжина дуги та температура її зменшуються за рахунок тепловіддачі, але, на жаль, ерозія робочої поверхні електричного контакту практично не зменшується.

Більш ефективний спосіб дугогасіння досягається із застосуванням дугогасних систем з магнітним дуттям [6 – 10, 9 – 17], які є решіткою, набраною із сталевих пластин, що застосовується в автоматичних вимикачах. В результаті, стовп дуги під дією електромагнітних сил та теплового потоку переміщається на решітку, розбивається на ряд коротких дуг та гасне. При такому способі гасіння електричної дуги ступінь термічної іонізації дуги зменшується, але такий спосіб сприяє збільшенню габаритів електричних апаратів і природно призводить до витрати елементів складів дугогасних пристроїв. І знову ж таки проблема руйнування робочої поверхні контактів за рахунок ерозії залишається.

Для гасіння електричної дуги пропонуються рішення із застосуванням газвиділяючих складів у конструкціях дугогасних пристроїв, що сприяє зниженню температури та збільшенню тиску в зоні розташування дугового

розряду, що зменшує час його існування [8 – 10]. Але і в цьому випадку, на жаль, повністю проблему руйнування робочої поверхні контактів вирішити не вдається.

З показаних вище пропозицій видно, що автори вирішують завдання приватного характеру. Насправді такі рішення не вирішують проблеми розвитку ерозії робочої поверхні електричних контактів.

Більшість прикладних та фундаментальних досліджень ерозії робочої поверхні контактів, а також розвитку дугового розряду, який при взаємодії з процесами в приелектродних областях переходить в електричну дугу в міжконтактному проміжку, присвячена вивченню процесів у його прикатодній області та на поверхні катода електричного контакту [71 – 76].

Це говорить про те, що розв'язання проблеми, пов'язаної з причинами виникнення ерозії робочої поверхні електричних контактів, необхідно починати з теорії розвитку та взаємодії процесів, що відбуваються на робочій поверхні до моменту утворення електричної дуги у міжконтактному проміжку під час розходження електричних контактів. У цьому необхідно обов'язково враховувати можливе прояв властивостей елементів складів композицій за її експлуатації.

Таким чином, виходячи з аналізу робіт, очевидно, що необхідно шукати інші шляхи або рішення, які сприяють зменшенню ерозії робочої поверхні електричних контактів без застосування токсичних елементів у складах композицій і збільшення габаритів, як контактних систем, так і комутаційних електричних апаратів. Одним із таких рішень є активування робочої поверхні контактів.

## **2.3. Процеси, що характеризують термодіємну активність елементів складів композицій електричних контактів**

### **2.3.1 Електронно-енергетичний стан поверхні катода електричних контактів**

Однією з найважливіших величин, характеризуючих будь-яку систему та її стан, є енергія [90 – 98].

Сучасна теорія твердих тіл виходить із припущень, що спрощують. Природно за таких спрощень неможливо пояснити всі ті властивості твердого тіла і показати докладно стан будь-якої системи без знання фізико-хімічних властивостей елементів, що входять до певного складу контактних композицій [50, 73 – 74].

Тому, при визначенні фізико-хімічних властивостей елементів, що входять до складу композицій електричних контактів, неможливо пройти повз такі важливі питання як енергетичний стан системи, що визначається розташуванням і взаємодією частинок.

Система, що складається з великої кількості атомів, молекул, іонів, електронів, аналізується за допомогою статистичної теорії твердого тіла із застосуванням фізико-математичних виразів, а саме оператора Гамільтона, рівняння Шредінгера та ін [73, 91 – 94, 96]. Звичайно, повністю розглянути теорію стану всієї системи просто неможливо. Необхідно зупинитися лише на основних положеннях електронного стану системи, що має характер енергії кулонівської взаємодії, та визначається, виходячи із законів квантової механіки, яку можна представити як загальну енергію у вигляді суми парціальних енергій, що відображено у роботах [91, 96].

Для визначення енергії міжмолекулярної взаємодії частинок необхідно враховувати такі положення [92, 94, 96]:

- між внутрішньомолекулярними взаємодіями атомів (хімічно пов'язаних і пов'язаних) немає жодних важливих відмінностей, і вони представлені подібними співвідношеннями, і навіть різняться кількісно;

- міжмолекулярні взаємодії частинок представлені як суто кулонівська електростатична взаємодія ядер та хмар негативного електричного заряду аналізованої системи (молекули або групи молекул);

- повна електронна енергія частинок представлена у вигляді суми за окремими структурними елементами та парами структурних елементів.

З урахуванням показаних положень ці завдання вирішуються з поділу систем на частини, в яких легше розглядати окремі молекули, що взаємодіють між собою. Узагальнення потім переноситься на більше взаємодіючих частинок або систем. Наприклад, аналіз даних тверджень розглядається із наступної моделі (рис. 2.13).

Є молекулярна система, що складається з  $K$  ядер, різної конфігурації, яка поділена на дві частини  $MA$  та  $MB$ , відповідно з ядрами  $KA$  та  $KB$ . Центри ядерних зарядів частинок  $MA$  та  $MB$  віддалені на відстань  $r_{AB}$  значно більше відстаней між ядрами в кожній з двох її частин.



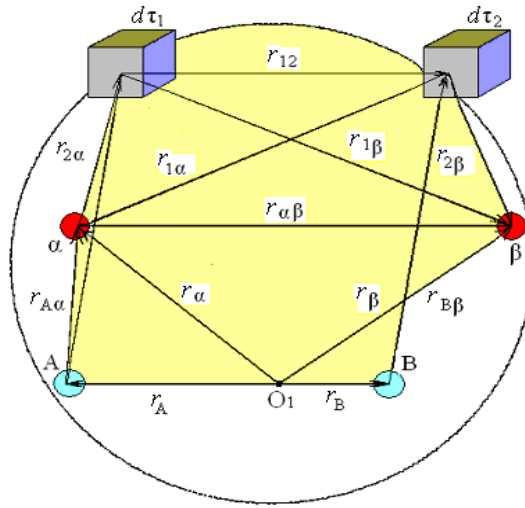


Рисунок 2.13 – Міжмолекулярна взаємодія частинок

Тоді вираз енергії для двох частин визначається як:

$$E^{el} = E_A^{el} + E_B^{el} + E_{AB}^{el}, \quad (2.5)$$

де  $E_A^{el}$ ,  $E_B^{el}$  – потенційні енергії взаємодії системи.

Для визначення розподілу частинок та їх взаємодії, позначимо ядра, що входять до частини МА – номерами  $\alpha$ , що входять до МВ – номерами  $\beta$ .

Тоді енергії  $E_A^{el}$ ,  $E_B^{el}$ ,  $E_{AB}^{el}$  для частинок А та В визначаються як:

$$\begin{aligned} E_A^{el} = & \sum_{\alpha} \left\{ \int_{V_{\alpha}} \frac{Z_{\alpha} \rho_e d\tau_1}{r_{12}} + \frac{1}{4} \int_{V_{\alpha}} \int_{V_{\alpha}} \frac{\rho_{12} d\tau_1 d\tau_2}{r_{12}} + \frac{1}{2} \int_{V_{\alpha}} \frac{Z_{\alpha} \rho_e d\tau_1}{r_{1\alpha}^2} (r_{\alpha} \cdot r_{1\alpha}^0) \right\} + \\ & + \sum_{(\alpha, \alpha')} \left\{ \frac{Z_{\alpha} Z_{\alpha'}}{r_{\alpha\alpha'}} + \frac{1}{2} \int_{V_{\alpha}} \frac{Z_{\alpha'} \rho_e d\tau_1}{r_{1\alpha'}} + \frac{1}{2} \int_{V_{\alpha'}} \frac{Z_{\alpha} \rho_e d\tau_2}{r_{2\alpha}} + \frac{1}{2} \int_{V_{\alpha}} \int_{V_{\alpha'}} \frac{\rho_{12} d\tau_1 d\tau_2}{r_{12}} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \int_{V_{\alpha}} \frac{Z_{\alpha} \rho_e d\tau_1}{r_{1\alpha'}^2} (r_{\alpha} \cdot r_{1\alpha'}^0) + \frac{1}{2} \int_{V_{\alpha'}} \frac{Z_{\alpha} \rho_e d\tau_2}{r_{2\alpha}^2} (r_{\alpha} \cdot r_{2\alpha}^0) \right\}, \quad (2.6) \end{aligned}$$

де  $Z_{\alpha}$ ,  $Z_{\alpha'}$  – дипольні моменти ядра щодо центру зарядів ядер частини системи  $M_A$ ;  $\rho_{\alpha}$  – щільність негативного заряду у просторі навколо ядер;  $d\tau_1$ ,  $d\tau_2$  – елементи обсягу простору навколо ядер, в якому знаходяться електрони;  $r_{12}$ ,  $r_{\alpha}$ ,  $r_{\alpha'}$ ,  $r_{1\alpha}$ ,  $r_{\alpha\alpha'}$ ,  $r_{1\alpha}^2$ ,  $r_{1\alpha}^0$ ,  $r_{1\alpha'}$ ,  $r_{2\alpha}$ ,  $r_{2\alpha}^2$ ,  $r_{2\alpha}^0$  – відстані між частинками та їх елементами в межах об'єму з номерами  $\alpha$ ;  $V_{\alpha}$ ,  $V_{\alpha'}$  – обсяг системи частини із номерами  $\alpha$ ;  $\rho_{12}$  – густини частинок системи.

Аналогічний вираз для енергії  $E_B^{el}$  частки Ст.

Потенційна енергія частинок системи, що взаємодіють:

$$E_{AB}^{el} = \sum_{(\alpha,\beta)} \left\{ \frac{Z_\alpha Z_\beta}{r_{\alpha\beta}} + \frac{1}{2} \int_{V_\alpha} \frac{Z_\beta \rho_e d\tau_1}{r_{1\beta}} + \frac{1}{2} \int_{V_\beta} \frac{Z_\alpha \rho_e d\tau_2}{r_{2\alpha}} + \frac{1}{2} \int_{V_\alpha V_\beta} \frac{\rho_{12} d\tau_1 d\tau_2}{r_{12}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \int_{V_\alpha} \frac{Z_\beta \rho_e d\tau_1}{r_{1\beta}^2} (r_\beta \cdot r_{1\beta}^0) + \frac{1}{2} \int_{V_\beta} \frac{Z_\alpha \rho_e d\tau_2}{r_{2\alpha}^2} (r_\alpha \cdot r_{2\alpha}^0) \right\}, \quad (2.7)$$

де  $Z_\beta$  – дипольні моменти ядра щодо центру зарядів ядер частини системи  $M_B$ ;  $r_{1\beta}$ ,  $r_\beta$  тощо – відстань між частинками та їх елементами в межах об'єму з номерами  $\beta$ ;  $V_\beta$  – обсяг системи частини з номерами  $\beta$ .

Вираз (2.7) дає (в неявному вигляді) енергію взаємодії для будь-якої відстані між молекулами за будь-яких відносних кутах повороту. Звичайно, взаємодія двох частин системи  $M_A$  і  $M_B$  розглядається приблизно, але показані вирази можна використовувати визначення міжмолекулярного взаємодії всередині окремих молекул. Енергія міжмолекулярної взаємодії  $E_{AB}^{el}$  представлена як сума для більших структурних елементів, а не лише для однієї молекулярної системи. В цілому для системи, що сполучає елементи обсягів  $d\tau_1$ ,  $d\tau_2$  з урахуванням векторів  $r_{12} = r_{AB} - r_{B2} - r_{A1}$ , та складних математичних перетворень отримано загальну формулу для енергії  $E_{AB}^{el}$  частин системи  $M_A$  і  $M_B$ , наведена до вигляду:  $E_{AB}^{el} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{r_{AB}^n}$ . Параметри  $C_n$  залежать від відносного повороту частин молекул  $M_A$ ,  $M_B$ , тобто. від відповідних кутів.

При концентрації частинок  $n = 1$

$$C_1 = \frac{1}{2} \left\{ r_{AB}^0 \left[ \left( 2 \sum_{(\alpha,\beta)} Z_\alpha Z_\beta r_{AB}^0 \right) + \left( \sum_{\beta} Z_\beta \int_{V_A} \rho_e r_{1\beta}^0 \left[ 1 + \frac{Z_A (r_{1\beta}^0 r_{AB}^0)^2}{Z_A + Z_B} d\tau_1 \right] \right) \right] + \right. \\ \left. + \left( \sum_{\alpha} Z_\alpha \int_{V_B} \rho_e r_{2\alpha}^0 \left[ 1 - \frac{Z_B (r_{2\alpha}^0 \cdot r_{AB}^0)^2}{Z_A + Z_B} d\tau_2 \right] + \int_{V_A V_B} \rho_{12} d\tau_1 d\tau_2 r_{12}^0 \right) \right\}, \quad (2.8)$$

при  $n \geq 2$

$$\begin{aligned}
C_n = & \frac{1}{2} \left\{ r_{AB}^0 \left[ \left( 2 \sum_{(\alpha, \beta)} Z_\alpha Z_\beta \left[ (r_{A_\alpha} \cdot r_{AB}^0) + (r_{B_\beta} \cdot r_{BA}^0) \right]^{n-1} \cdot r_{\alpha\beta}^0 \right) + \right. \\
& + \left( \sum_{\beta} Z_\beta \int_{V_A} \rho_e r_{1\beta}^0 \left[ (r_{A_1} \cdot r_{AB}^0) + (r_{B_\beta} \cdot r_{BA}^0) \right]^{n-1} \left[ 1 + \frac{Z_A (r_{1\beta}^0 r_{AB}^0)^2}{Z_A + Z_B} \right] d\tau_1 \right) + \\
& + \left( \sum_{\alpha} Z_\alpha \int_{V_B} \rho_e r_{2\alpha}^0 \left[ (r_{A_\alpha} \cdot r_{AB}^0) + (r_{B_2} \cdot r_{BA}^0) \right]^{n-1} \left[ 1 - \frac{Z_B (r_{2\alpha}^0 \cdot r_{AB}^0)^2}{Z_A + Z_B} \right] d\tau_2 \right) + \\
& + \left( \int_{V_A} \int_{V_B} \rho_{12} \left[ (r_{A_1} \cdot r_{AB}^0) + (r_{B_2} \cdot r_{BA}^0) \right]^{n-1} \cdot d\tau_1 d\tau_2 r_{12}^0 \right) + \\
& \left. + \left( (n-1) \sum_{\beta} Z_\beta r_{B_\beta} \int_{V_A} \rho_e \left[ (r_{A_1} \cdot r_{AB}^0) + (r_{B_\beta} \cdot r_{BA}^0) \right]^{n-2} (r_{1\beta}^0 \cdot r_{AB}^0) r_{1\beta}^0 d\tau_1 \right) \right\}. \quad (2.9)
\end{aligned}$$

Аналогічним шляхом можливе узагальнення отриманого результату на випадок системи багатьох молекул, але із застосуванням додаткових умов. В цьому випадку одного квантовомеханічного розгляду енергії системи  $E^{el}$ , Як функції ядерної конфігурації, принципово недостатньо для поділу системи на окремі частини молекули, якщо не використовувати будь-яких положень, постулатів або інших даних [92, 99].

Таким чином, на прикладі показаної моделі можна розглядати взаємодію структурних елементів, що входять до складу композицій електричних контактів і можна визначити енергію при взаємодії частинок елементів.

### 2.3.2 Розподіл частинок за енергетичними рівнями та визначення роботи виходу електронів

Виходячи з основних положень статистичної теорії твердого тіла, енергія електрона, що знаходиться поза тілом контакту, визначається дією силових ліній [53, 84, 92, 95, 100]. Потенційну енергію  $U(r)$  електронів у просторі можна вважати однаковою та рівною нулю, якщо силові лінії поза тілом контакту відсутні.

Досліджуючи різні причини, що визначають процес утворення ерозії робочої поверхні електричних контактів, передбачається, що важливу роль відіграє робота виходу елементів композицій, що залежить від явища термоелектронної емісії [77 – 89]. На жаль, дослідники, які займаються визначенням властивостей контактних композицій, не враховують дане явище

або розглядають його лише з погляду розвитку процесів у поверхневих шарах.

Незважаючи на значну залежність роботи виходу елементів від стану поверхні, більшість сучасних дослідників вважають, що визначальною є електронна структура твердого тіла, яка обумовлює особливості електронної будови приповерхневих шарів, фактично здійснюють емісію електронів. Це підтверджують численні емпіричні та напівемпіричні залежності між роботою виходу та фізико-хімічними властивостями твердого тіла, що визначаються специфікою електронного стану системи [39, 54].

Якщо електрон поза тілом контакту рухається, його повна енергія  $E_H > 0$ . У середині тіла композиції контактів можливі стани електронів як позитивні, і негативні з енергіями  $E_B$  (рис. 2.14).

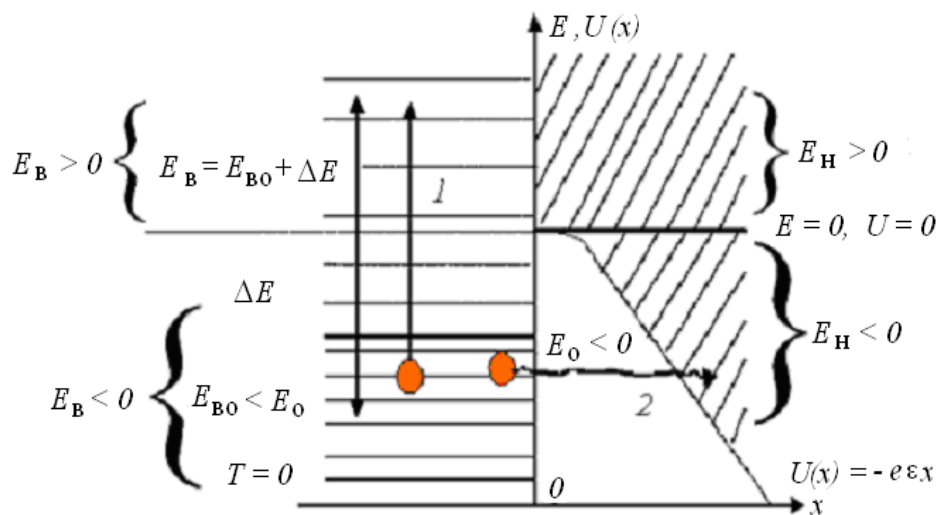


Рисунок 2.14 – Розподіл енергії електронів за рівнями

Як видно з малюнка, при температурі  $T = 0$  та потенційної енергії  $U(r) = 0$ , найнижчі рівні займають електрони у незбудженому стані системи з певними енергіями.

Відповідно, електрони не можуть залишити систему, а значить, їхня емісія неможлива. Щоб електрони емігували з поверхні, їм необхідно повідомити енергію  $\Delta E$ . В результаті відбудеться збудження електронів до стану  $E_{B0} + \Delta E$  (Перехід 1).

Якщо до поверхні прикладено однорідне зовнішнє електричне поле, то потенційна енергія у ньому визначається як:

$$U(x) = U_0 - e\epsilon x,$$

де  $x$  – відстань від межі твердого тіла композиції електричного контакту;  $U_0$  – потенційна енергія електрона при  $x = 0$ ;  $\epsilon$  – напруженість електричного поля.

Якщо на межі тіла композиції  $U_0 = 0$ , тоді:  $U(x) = -e\epsilon x$ .

Повна енергія електрона за наявності силових ліній поля біля поверхні тіла контакту  $\geq U(x) = -e\epsilon x$ , тобто, енергія електрона може бути негативною і набувати значення  $E_n = E_{BO} \leq E_0$ .

Області, в яких відбувається рух електронів із рівнем  $E_{BO} = E_n$ , розділені просторово – потенційним бар'єром. При  $U(x) > E_{BO}$ , виходячи із законів квантової механіки, можливий перехід 2 електрона з тіла до зовнішнього простору шляхом тунельного ефекту. У цьому емісія електрона вимагає попереднього порушення (автоелектронна емісія).

Аналогічна ситуація можлива, якщо поблизу поверхні тіла знаходиться позитивний іон, що створює кулонівську потенційну яму (рис. 2.15) [93]. Показана модель пояснює розподіл електронів та іонів на поверхні композиції електричних контактів. Будь-які частинки (атоми, молекули, нейтральні частинки) з твердої робочої поверхні композиції електричного контакту емітуються у різний спосіб.

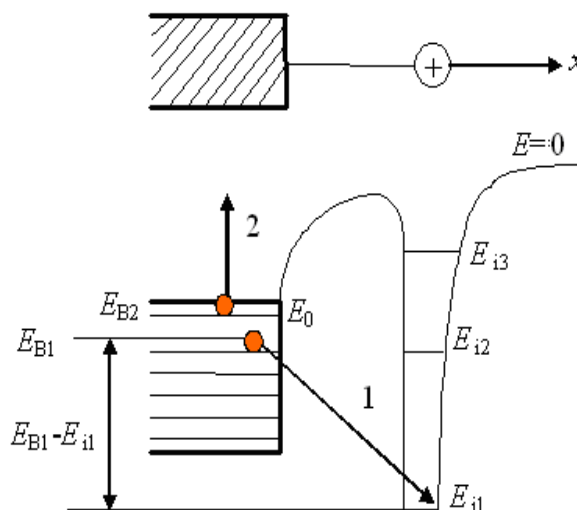


Рисунок 2.15 – Потенційна яма

Найпоширенішими є способи емітування частинок при тепловому та механічному впливі. При цьому частинки, що емітуються, адсорбуються на робочій поверхні складу композиції електричних контактів або йдуть з поверхні, володіючи достатньою енергією, за рахунок подолання сил, що утримують ці частинки на поверхні.

Ознаки класифікації емісії частинок за:

- джерелу енергії активації (теплова та кінетична);
- хімічній природі емітованих частинок;
- зарядний стан (нейтральне, позитивне, негативне).

Найскладнішим є визначення емісії електронів із робочої поверхні

електричних контактів, т.к. одночасно відбувається одразу кілька видів емісій. Наприклад, при високих температурах відбувається одночасно термоелектронна емісія та емісія атомних частинок з різним видом збудження. Також, поряд з процесами виходу електронів з робочої поверхні катода електричних контактів під час бомбардування іонами, відбуваються процеси випромінювання атомних частинок.

Термоелектронна емісія характеризується величиною густини струму насичення [39].

$$j_s = A_0 \cdot (1 - R) \cdot T^2 \cdot \exp\left[-\frac{e\varphi}{kT}\right], \quad (2.10)$$

де  $A_0$  – універсальна стала для всіх видів емітерів;  $R$  – середній коефіцієнт відображення електронів від кордону;  $T$  – температура поверхні катода;  $e$  – заряд електрона;  $\varphi = -E_0$  – робота виходу (енергія) електронів із поверхні катода композиції електричних контактів.

Для виведення основного рівняння густини струму термоемісії (2.10) виходять із завдань термодинамічних функцій, що визначають стан системи [73]. На жаль, ці завдання не можуть вирішуватися окремо і навряд чи можуть бути доведені до кінця. По-перше, щоб одержати вираження густини струму емісії необхідно залучення законів квантової статистики. По-друге, рішення рівняння щільності струму емісії виходить, у кінцевому вигляді, лише системи вільних електронів.

Необхідно шукати інші шляхи вирішення таких завдань, і, ймовірно, вони повинні бути комбінованими.

Таким чином, випромінювання електронів та частинок (атомів) з робочої поверхні під дією температури визначається явищем термоелектронної емісії. Зіставляючи емісійні явища, як електронів, так і атомних частинок, видно, що вихід електронів і частинок з потенційної ями та подолання ними потенційного бар'єру, в основному, залежить від роботи виходу, яка є мірою енергії зв'язку електронного газу всередині складу композиції контактів та на його робочої поверхні.

Саме поняття «робота виходу» відоме з розвитку електронної теорії металів [27, 39, 54]. Існування електронного газу як усередині, і на поверхні будь-якого електрода пояснюється дією сил, які перешкоджають вильоту вільних електронів у зовнішній простір. Тому при видаленні електрона з металу здійснюється робота проти цих сил – робота виходу, яка визначається

як  $\chi = e\phi = \int_{-b}^{\infty} f(x)dx$  і дорівнює стрибку потенційної енергії електрона межі металу.

Спроби визначення залежності роботи виходу ( $\phi$ ) від розташування в періодичній системі елементів  $a$ , отже, від різних атомних властивостей металів робилися ще, починаючи з 30<sup>x</sup> років [88, 102 – 104].

На жаль, роботи середини 60<sup>x</sup> років [39, 95, 101], необґрунтовано заперечували вплив електронної будови поверхневого шару Це призводило до твердження, що робота виходу електронів є характеристикою не певного складу твердого тіла, а лише щільності і характеру упаковки атомів поверхні.

Велику роль при протіканні емісійних процесів грає стан поверхні [39, 84, 95, 101], який включає не лише визначення хімічної природи поверхневих атомів, закони їх руху та взаємного розташування, а й електронного стану самих атомів. При цьому структурно-геометричні фактори відповідальні за електростатичний подвійний шар на поверхні, а характеристики міжатомної електронної взаємодії – за обмінний та кореляційний вклади у величину поверхневого потенційного бар'єру.

Але все-таки, головним залишається тип хімічного зв'язку атомів у ґратах кристала та характер взаємодії, що визначається активністю атомів, числом найближчих сусідів, енергією взаємодії [54]. Цей зв'язок визначається відстанню між одних атомів до розташованих інших атомів. Енергія взаємодії між атомами зменшуватиметься зі збільшенням відстані. Тому необхідно враховувати енергію лише поруч розташованих атомів.

Багато авторів ранніх робіт дають різне визначення виходу. Одним з перших пояснень фізичної природи роботи виходу металів було запропоновано Дебаєм та Шотткою [39], які розглядають її як роботу, що чиниться проти поляризаційних сил.

У деяких теоріях металів [99] поляризаційна частина роботи виходу має такий сенс. При видаленні одного з електронів металу електрони, що залишилися в ньому, виявляються в інших умовах, ніж до видалення. Це викликає зміну станів електронів, що залишилися, і зростання їх енергій на величину поляризаційної частини роботи виходу.

Теорія Зоммерфельда, говорить про те, що вільні електрони йдуть за межі металу і утворюють поблизу поверхні негативно заряджений електричний шар, який разом з надмірними позитивними зарядами іонів під поверхнею утворює подвійний електричний шар, поле якого гальмуватиме електрони, що проходять

крізь нього, з металу.

Ця точка зору збігається із сучасною теорією твердого тіла. При цьому для металевого кристала центр тяжкості електронної хмари в кожному осередку збігається з ядром атома, тому дипольний момент цих осередків дорівнює нулю.

Для осередків, розташованих межі металу спостерігатиметься зовсім інша картина, так як електронна хмара в них буде розташована несиметрично щодо ядер атомів. Тому кожен осередок матиме свій дипольний момент, а сукупність їх утворює подвійний електричний шар, який характеризується поверхневою щільністю атомів.

Розглянуті дві складові роботи виходу (поляризаційна і пов'язана з подвійним електричним шаром біля тіла) мають позитивний знак при виході електрона з емітера і негативний – при вході електрона до нього, тобто. є оборотними (для ідеального металу).

Але є й незворотна частина роботи виходу, у якій вважається, що система електронів перебуває у “замороженої” решітці. Різниця енергетичних станів нічого очікувати визначатися структурою поверхні, так як все одно система струмів виділить у кристалі деяке джоулеве тепло. Це тепло проявиться у зміні енергії коливань кристалічних ґрат. Повна зміна енергії тіла складатиметься із зміни енергії системи електронів та енергії кристалічних ґрат. Тоді зміна енергії решітки, викликане релаксаційними явищами має однаковий знак як із видаленні електрона з тіла, і при введенні електрона ззовні, тобто. є незворотною частиною роботи виходу, а значить, вона не дорівнюватиме нулю. Ця частина роботи виходу позначатиметься в явищах емісії електронів, але контактна рівновага, напевно, від неї не залежатиме. Таке поняття роботи виходу притаманно однорідних катодів що складаються, наприклад, з вольфраму, танталу, молібдену та інших.[39, 54].

Для неоднорідної поверхні катода (грані мікрокристалів з різними атомами інших елементів) характерна наявність контактних різниць потенціалів [39, 54], що призводять до зміни властивостей складів композицій електричних контактів та їх виходу.

Справа в тому, що електричний контакт, який містить різні елементи, має «плямисту» поверхню. Така провідна поверхня електричного контакту, у стані рівноваги, не є екіпотенційною, якщо робота виходу електронів неоднакова по всій поверхні.

Електрон, у разі, при виході з елемента, здійснює додаткову роботу, тобто. він долає як потенційний бар'єр, утвореного електронного газу, а й



потенційний бар'єр поля плям. Дія бар'єру плям або зменшується або збільшується. Це свідчить, що сили поля спрямовані до поверхні, де мінімальна чи максимальна робота виходу електронів. Енергетичний стан поверхні контакту розглянуто з прикладу моделі, показаної на рис. 2.16 [39, 53].

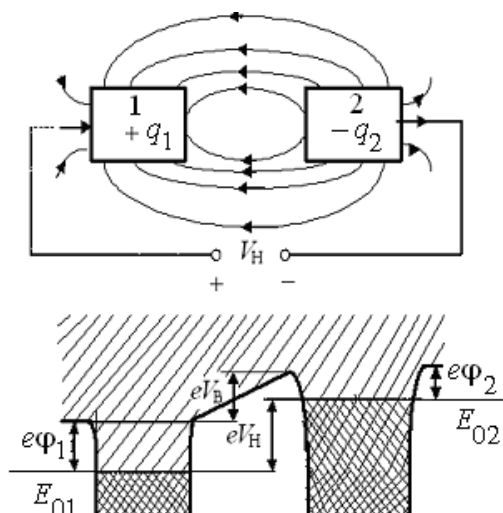


Рисунок 2.16 – Розподіл електронів за зовнішньої різниці потенціалів

Якщо зовнішня різниця потенціалів  $V_H \neq 0$ , причому підведена від будь-якого джерела е.р.с., то повна внутрішня енергія визначається як:

$$V_B = V_H + V_{\text{крп}}, \quad (2.11)$$

де  $V_{\text{крп}} = \varphi_1 - \varphi_2$  – контактна різниця потенціалів;  $\varphi_1, \varphi_2$  – робота виходу елементів складу композиції.

При цьому рівень електрохімічного потенціалу  $E_{02}$  у тілі контакту, приєднаного до мінусу джерела  $V_H$ , буде вище за рівень  $E_{01}$ , у тілі контакту, який приєднаний до позитивного полюса джерела  $V_H$ .

Таким чином, виходячи з аналізу даних робіт, визначено, що через наявність неоднорідності поверхні катода електричних контактів, робота виходу складів поверхні визначається властивостями сусідніх елементів, величиною електричного поля, контактною різницею потенціалів.

### 2.3.3 Основні методи активування, що сприяють зміні властивостей складів композицій електричних контактів

Зменшення ерозії робочої поверхні електричних контактів можливе підвищенням термоемісійної здатності складів композицій електричних контактів, що досягається методами активування (фізичними, хімічними, механічними) їхньої робочої поверхні.

Одним з поширених методів активування є метод конденсації та пароподібного стану [30, 51, 78 – 80, 83, 105], який заснований на випаровуванні речовин з підкладки, що містить активну сполуку, з наступним осіданням на електроді (катоді), де відбувається швидка конденсація атомних або молекулярних пар у високому вакуумі. В результаті неупорядкованого осадження на поверхні катода утворюються плівки, які суттєво відрізняються за своїми властивостями (електричними, магнітними, механічними тощо).

Багато дослідників використовують метод активування за Ленгмюром (схожим на попередній), який заснований на процесах дифузії [66, 81 – 83, 106], де показано, що по відношенню до металу-основи, на поверхні, що емітує електрода (катода) адсорбується моноатомний шар електропозитивних атомів активуючого складу (рис. 2.17).

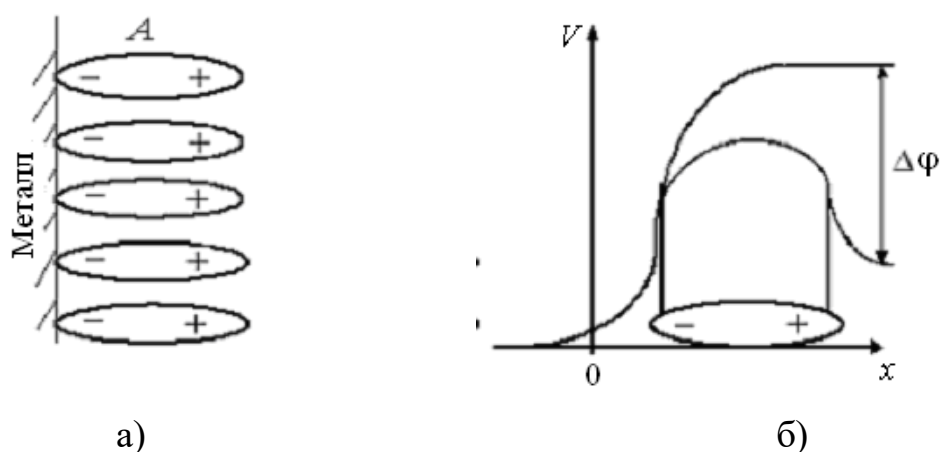


Рисунок 2.17 – Розподіл моноатомного шару поверхнею металу-основи

Як активуючу добавку використані оксиди торію ( $\text{ThO}_2$ ), лантану ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ), ітрію ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), цирконію ( $\text{ZrO}_2$ ), цезію ( $\text{Ce}_2\text{O}_3$ ) тощо. Внаслідок високої температури відбувається дифузія атомів активатора через метал-основу. Поляризуючись на межі метал-вакуум, атоми складу, що активує, утворюють на поверхні металу-основи електричний диполь (рис. 2.17, а), спрямований негативним полюсом до металу – основи. В результаті при сукупності таких диполів утворюється подвійний електричний шар, який викликає стрибок потенціалу в утвореному шарі (рис. 2.17,б).

Стрибок потенціалу в цьому подвійному шарі дорівнює:

$$\Delta\varphi = 4\pi n_d p, \quad (2.12)$$

де  $n_d$  – число диполів на  $1 \text{ см}^2$ ;  $p$  – момент окремого диполя.

В результаті такого методу активування робота виходу складу композиції

змінюється, порівняно з не активованими складами.

Різні способи активування застосовуються в основному в генераторах низькотемпературної плазми для вольфрамових електродів (катодів) плазмотронів [35, 42, 51, 80, 107] та ін.

Основним параметром, що визначає режим роботи дугових катодів, є температура робочої поверхні, за допомогою якої можна оцінити емісію електронів, ерозію поверхні, визначити баланс енергії тощо. Причому значення температури поверхні змінюється у широких межах, включаючи температуру кипіння складу дугового катода. При визначенні температури поверхні катода різними способами визначається густина сумарного струму  $j$ , щільність теплового потоку  $q$ , ефективна робота виходу електронів  $\eta_{ef}$ , катодне падіння потенціалу  $U_k$ , температура електронів  $T_e$  поблизу робочої поверхні.

Метод активування при механічній обробці складу полягає в утворенні дефектів кристалічної решітки в результаті стиснення, розтягування або прокатки композицій електричних контактів. При такому способі активування в основному зберігається структура металевого складу і зростає його активність, але цілісність робочої поверхні при роботі електричних контактів все-таки порушується [108].

Для металокерамічних контактів активність складу композиції зростає при розмелі, розтиранні або дробленні, внаслідок чого виходить дуже тонко подрібнений склад композиції електричних контактів, в якому домінуючу роль відіграє збільшення поверхні.

При такому механічному активуванні активність складів композицій електричних контактів зростає за рахунок накопичення механічної енергії в кристалі, що також призводить до підвищення ентальпії.

Для металокерамічних контактів тонке подрібнення компонентів композиції має межу активування, так як вільна ентальпія порошку значно підвищується, тому виникає нестійкий стан. В результаті при виготовленні композицій електричних контактів спостерігається злипання частинок металевих порошоків елементів, що входять до складу композицій. Основну роль процесі злипання грають Ван-дер-Ваальсові сили зчеплення між частинками елементів [81, 83, 92, 100]. Ці сили за досить малих розмірах часток настільки великі, що у зоні контактування відбувається локальна пластична деформація частинок при взаємному проникненні друг в друга. Внаслідок цього для поділу фракцій складу композиції потрібні великі сили, які у багато разів перевищують масу частинок. Для зменшення сил зчеплення між малими частинками при виготовленні шихти з елементів, що входять до складу

композицій електричних контактів, застосовують центрифуги. При заданому діаметрі частинок відцентрова сила підвищується до того часу, поки частинки не відокремляться друг від друга. Це призводить до застосування додаткового обладнання, а також до енергетичних витрат та часу виготовлення шихти складу.

*Метод контактної різниці потенціалів (КРП) [39, 53] для визначення роботи виходу є найбільш точним і заснований на вимірі різниці потенціалів між досліджуваним зразком та електронному порівнянні, у якому використовується еталонний зразок. Отримані дані оброблялися за такою формулою:  $U_k = \phi_{\text{ýñ}} - \phi_{\text{íáð}}$ . Знаючи роботу виходу електронів  $\phi_{\text{ýñ}}$  еталонного зразка та вимірявши контактну різницю потенціалів  $U_k$ , визначається робота виходу електронів досліджуваного зразка  $\phi_{\text{íáð}}$ .*

В даний час немає прямих і строгих методів вимірювання прикатодного падіння потенціалу  $U_k$ . Існуючі методи слід розглядати як наближені, а результати, отримані з допомогою – як оцінні значення  $U_k$ .

Зазвичай значення виходу приймаються середніми, так як поверхня катода електричного контакту є мозаїкою різних кристалографічних граней. Тоді, з урахуванням розташування кристалів, очевидно, що робота виходу характеризує стан елементів, що входять до складу композицій електричних контактів і структуру їх робочих поверхонь. Тому, ймовірно, термін «робота виходу» відноситься до роботи виходу певної ділянки робочої поверхні.

Таким чином, існують різні методи активування, які використовуються для визначення та зміни роботи виходу елементів, що входять до складу композицій електричних контактів.

### **2.3.4 Способи та результати активування робочої поверхні електричних контактів**

Термоемісійна активність елементів також визначається експериментальним шляхом, причому визначення значення їхньої роботи виходу найкраще розглядати без сторонніх домішок. У роботах [66, 78, 80 – 83, 106] пояснення термоемісійної активності окремих елементів, дослідники як дугових катодів використовували електроди з вольфраму, так як даний елемент має високу температуру плавлення, кипіння, низьку швидкість випаровування, високу механічну міцність і теплопровідність. Так, наприклад, робота виходу вольфраму, активованого торієм, зменшується до 2,6 еВ порівняно з вольфрамом без домішок, у якого робота виходу становить 4,54 еВ і,

відповідно, робота виходу торію без домішок становить 3,3 еВ [66, 81 – 83, 106].

Інтерес представляють результати, відображені у роботах [74 – 83], де за емісійної здатності локальних областей поверхні катода з вольфраму, змінюється теплове поле дуги. Особливістю даного процесу є зміна роботи виходу при досягненні деяких значень температур. Об'єктами дослідження були електроди:

- з металокерамічного та прокатаного вольфраму;
- металокерамічні електроди з вольфраму активовані окисом ітрію ( $W+3\% Y_2O_3$ ).

Дослідження роботи виходу складу композиції проходило в електронному мікроскопі з наступними параметрами кількість розрядів – 100, частота дії – 0,33 Гц, індуктивність контуру  $\sim 150$  мкГн, ємність – 600 мкФ, енергія імпульсу – 800 Дж., де температура поверхні електродів. Процес активування протікав так (рис. 1.18).

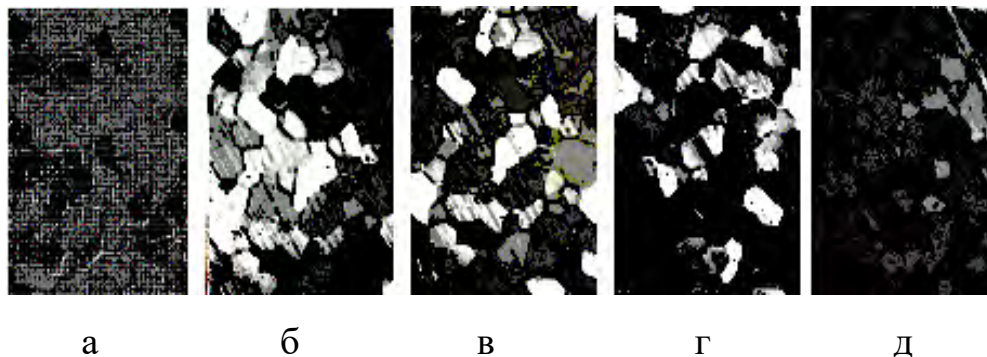


Рисунок 2.18 – Процес розвитку емісії електронів елементів електродів з вольфраму, активованого окисом ітрію ( $W+3\% Y_2O_3$ )

При нагріванні шліфу зразка електрода ( $W + 3\% Y_2O_3$ ) до температури  $1005\text{ }^\circ\text{C}$  з'явилося світіння частинок активатора окису ітрію ( $Y_2O_3$ ) (рис. 2.18, а). Яскравість свічення частинок активатора збільшується з підвищенням температури.

При подальшому збільшенні температури до  $1420\text{ }^\circ\text{C}$  починають світитися зерна вольфраму (рис. 2.18, б), які поступово покриваються плівкою, що світиться.

Цей процес показує, що починає активуватись вольфрам, за рахунок процесів дифузії, який просувається від межі зерна. Світиться плівка, що утворилася, може повністю покрити зерно вольфраму при температурі  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ , і надалі, деякий час вона зберігається до температури  $1640\text{ }^\circ\text{C}$ .

Після досягнення зазначеної температури плівка, що світиться, поступово

зникає як би “тане”, тобто. відбувається дезактивація (рис. 2.18, в; г). При температурах 1440 – 1420 °С плівка, що світиться, як би “сповзає” із зерна у зворотному напрямку (рис. 2.18, д). При багаторазових циклах нагрівання-охолодження процес послідовної та різкої зміни роботи виходу окремих зерен повторюється (рис. 2.19).

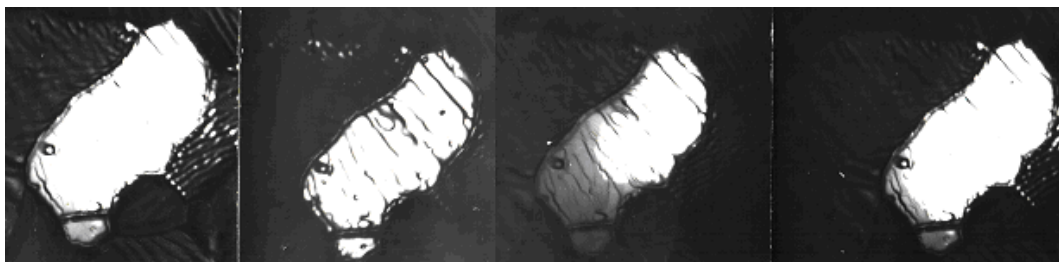


Рис. 2.19. Процес активування одного зерна складу

Такі ж дослідження були проведені для зразків із неактивованим вольфрамом. При порівнянні результатів виявилось, що від впливу імпульсних розрядів найбільше постраждали поверхні зразків неактивованих вольфрамових електродів.

При подальшому дослідженні процесів на дугових вольфрамових катодах з активуючою добавкою було визначено, що при високій температурі істотну роль грають процеси випаровування активованого складу з поверхні, розпилення та дифузії, т.к. поверхня катода зазнає інтенсивного бомбардування іонами.

При цьому відбувається виникнення нових хімічних зв'язків, і процеси дифузії, що інтенсивно розвиваються, сприяють різкому зростанню концентрації частинок газу в приповерхневому шарі електрода. Дифузія активованого складу визначається низкою взаємопов'язаних нестационарних процесів, що залежать від рівня температури, структури складу композиції катода, концентрації активованих добавок тощо. Розгляд аналітичного завдання нестационарного процесу утруднюється відсутністю достовірних даних про коефіцієнт дифузії та інших параметрів складу дугових катодів. Крім того, у процесі роботи таких катодів частина атомів активованого складу випаровується з поверхні катода, а після іонізації в прикатодній зоні повертається назад.

У разі високих температур, реалізованих термокатадах з вольфраму, істотну роль грають процеси випаровування складу. Швидкість випаровування складу у вакуумі визначається законом Ленгмюра [36]:

$$\dot{m} = p_{\text{a}} / \sqrt{2\pi R_{\text{a}} T / M} , \quad (2.13)$$

де  $\dot{m}$  – швидкість випаровування частинок;  $p_{\text{r}}$  – тиск насиченого газу;  $R_{\text{r}}$ ,  $M$  – газова постійна та молекулярна маса.

Залежність швидкості випаровування  $\dot{m}$  і тиску насиченої пари  $p_{\text{r}}$  від температури має вигляд:

$$\lg \dot{m} = \tilde{A} - 0,5 \lg T - B/T , \quad (2.14)$$

$$\lg p_{\text{a}} = A - B/T , \quad (2.15)$$

де  $A$ ,  $B$ ,  $T$  – константи для визначення швидкості, випаровування та тиску насиченої пари матеріалу.

Плазмоутворюючі гази містять, як правило, хімічно активні домішки. Наявність домішок кисню викликає підвищення швидкості випаровування за рахунок утворення більш летких оксидів вольфраму.

Швидкість випаровування вольфраму при температурі вище точки плавлення мінімальна, що знайшло широке його застосування як матеріал для дугових катодів.

Окрім вольфрамових катодів дослідження проводилися також на основі цирконію (Zr) та гафнія (Hf) у кисні, азоті та вуглеводневих атмосферах, де були отримані, практично, такі ж результати.

Таким чином, рядом проведених досліджень, показаних у цих роботах, визначено, що активовані елементи мають цілу низку специфічних фізико-хімічних особливостей:

- поряд із перетворенням різних видів енергій, відбуваються процеси, пов'язані з виникненням контактної різниці електричних потенціалів, які можуть вирівнюватися за рахунок газового розряду при світловому випромінюванні та емісії електронів;

- завдяки контактній різниці потенціалів дві поверхні різних твердих тіл набувають протилежних зарядів лише за рахунок дотику. Контактні різниці потенціалів також виникають між однорідними сполуками, якщо дотичні поверхні завдяки адсорбційним плівкам або впливу дефектів реальної структури сполук мають різні роботи виходу;

- виміри контактних потенціалів показують, що емісія виникає внаслідок зниження роботи виходу електронів. Робота виходу електронів із наростанням окисного шару проходить через мінімум, що досягається при

моноатомному покритті поверхні;

– утворення зарядів відбувається шляхом переходу вільних електронів у металів за рахунок обміну зарядами між поверхнями переходу слабо пов'язаних іонів. При переході набоїв створюється дипольний шар, який при відділенні поверхонь розривається так, що поверхні залишаються зарядженими. Величина заряду пропорційна площі, отже, вона визначається ступенем активації. Щільність заряду залежить від контактного потенціалу та дійсної площі контактування;

– розряди, що з'являються після розриву контакту між зарядженими поверхнями, визначаються напруженістю поля та різницею потенціалів між поверхнями, які виявляються зазвичай за холодним випромінюванням або газовим розрядом. При перевищенні напруги іскрового розряду різниці потенціалів вирівнюються за допомогою газового розряду з випромінюванням світла;

– активування твердої фази не може розглядатися незалежно від навколишньої газової атмосфери, тому що вона бере участь в енергетичних перетвореннях. Свіжі поверхні, отримані внаслідок пластичної деформації або руйнування, знаходяться у високому активному стані. У цих умовах за наявності відповідних реагентів відбуваються адсорбційні та хімічні взаємодії. Теплота, що при цьому звільняється, сприймається твердою фазою як термічна енергія і відводиться в сусідню фазу і всередину самої твердої фази.

Таким чином, аналіз проведених експериментів говорить про те, що шляхом активування збільшується емісійна здатність поверхні електрода, і внаслідок цього зменшується тепловий вплив катодної плями дуги на робочу поверхню. Через війну формується емісійна неоднорідність, з якої збільшується час життя катодних плям I роду, викликають мінімальну ерозію.

### **2.3.5 Дослідження складів композицій електричних контактів із активними складовими**

Зміна термоемісійної активності елементів спостерігається також при використанні складу композиції срібло-нікель (Ag-Ni) [49], що і визначило шлях зменшення зносу, і, відповідно, ерозії робочої поверхні електричних контактів комутаційних електричних апаратів. Дослідження проводилися з композицією контактів з певним процентним вмістом Ag, Ni та активуючої добавки на основі Ва та його сполук. Створені композиції електричних контактів задовольняли як основним вимогам, так і необхідним умовам активації елементів:



а) у багатофазній системі активувалася тугоплавка складова (Ni), що має високу температуру плавлення;

б) температура дезактивації Ni нижче його температури плавлення.

Електричні контакти були виготовлені методом порошкової металургії та призначені для різноманітних досліджень:

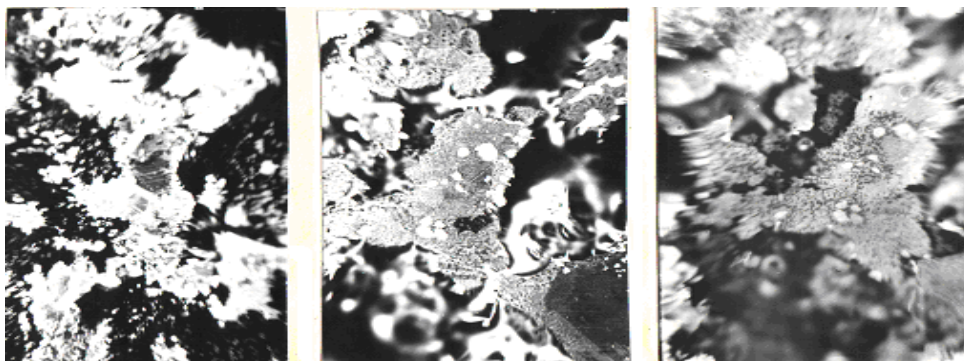
– визначення впливу активної складової на швидкість переміщення електричної дуги;

– дослідження дугостійкості та зносостійкості електричних контактів у пристроях, що імітують різні режими роботи електричних комутаційних апаратів;

– дослідження електричних контактів в автоматичних вимикачах та контакторах промислових зразків на струми до 1000 А.

В результаті активування складу композиції електричних контактів (Ag-Ni) робота виходу елементів складу значно знизилася, а саме для срібла з 4,3 еВ до 1,56 еВ, для нікелю з 4,5 еВ до 1,52 – 2,6 еВ. Робота виходу найактивніших складових має значення 0,99 еВ – 1,5 еВ [49, 90]. Крім того, активуючі складові мають високу температуру плавлення 1920 °С порівняно з нікелем (1460 °С) та сріблом (960 °С) [49, 90], а також низьку температуру спікання 760 °С порівняно зі складом (Ag-Ni) – 860 °С [90, 109].

Проведені дослідження емісійної структури активованих складів отриманих композицій за допомогою емісійного мікроскопа показали неоднорідність поверхні зразків (рис. 2.20).



а

б

в

Рисунок 2.20 – Процес активації робочої поверхні електричних контактів за різних температур

Як видно з рисунка зерна срібла на загальному тлі, порівняно із зернами нікелю, мають темний колір. Найяскравіший фон має активуюча складова, причому скупчення її видно за межами зерен.

Як показали дослідження, вже за температури  $T = 600$  °С починають

світлитися частинки активуючої складової (рис. 2.20, а), що підтверджує її низьку роботу виходу при даному складі композиції електричних контактів.

Процес активування нікелю спостерігався за температури  $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що підтверджується наявністю утворення світлої плівки (рис. 1.20, б).

Різна яскравість зерен елементів складу композиції електричних контактів, пояснюється їх різною кристалографічною орієнтацією.

Подальше підвищення температури до  $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$  призводить до зростання яскравості частинок активатора, але активний стан нікелю також зберігається. При температурі  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ , судячи з яскравості зерен складу композиції електричних контактів, відбувається дезактивація нікелю за подальшого збільшення емісії частинок активуючої добавки (рис. 2.20, в).

Металографічний аналіз отриманих зразків композицій електричних контактів (рис. 2.21) показав, що активуюча складова різної форми розташована

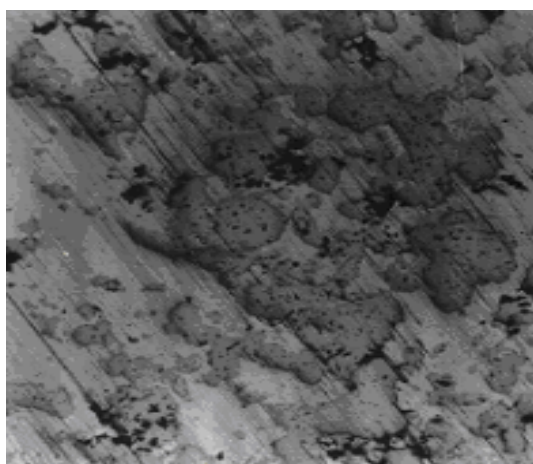


Рисунок 2.21 – Металографія композиції електричних контактів з активуючою складовою (100х)

в зернах нікелю або на межі розділу фаз нікелю та срібла.

За результатами отриманих досліджень було виготовлено дослідні зразки з різних складів активованих композицій, які пройшли попередні випробування на дугостійкість [49].

Проведені випробування на дуговий знос, активованих складів різних композицій електричних контактів, підтвердили процес активації та дали позитивний ефект, а саме – ерозія робочої поверхні електродів активованих контактів була незначною.

Контакти з активуючою складовою та без неї пройшли випробування на установці, що імітує режими роботи електричних контактів при комутації струму 3,7; 7,3; 10 кА. Експериментальні дослідження показали, що у середньому дугова ерозія активованих електричних контактів у 1,3 – 2,7 разу менше, проти промисловими зразками [16, 19, 49, 110]. Металографічні дослідження поверхонь показали, що характер ерозії поверхні активованих і не активованих зразків композицій дуже різний (рис. 2.22) і практично нагадує такий вигляд, як і при випробуванні контактів композицій на дуговий знос.

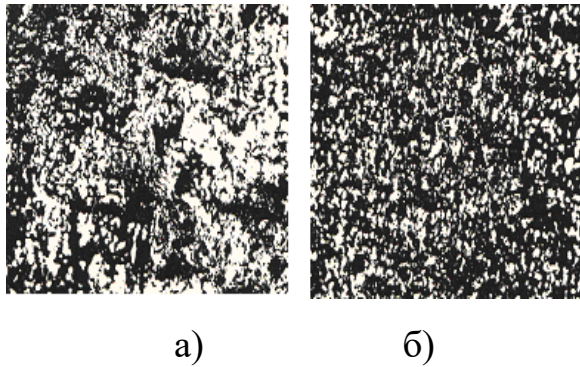


Рисунок 2.22 – Поверхня електричних контактів після випробування при струмі 10 кА (22х):

а – без активуючої складової, б – з активуючою складовою.

Робоча поверхня неактивованих зразків має дуже оплавлений рельєф і чітко видно сліди випаровування складу композиції, порівняно з активованими зразками, де ерозія робочої поверхні має рівномірний дрібноточковий рельєф.

Під час експериментів проводилося дослідження швидкості переміщення опорної точки електричної дуги по робочій поверхні контактів при напрузі 145 (гарантований пробою міжконтактного проміжку) [16, 19, 49, 110] при різних значеннях напруженості електричного поля. Результати експериментів показали, що швидкість переміщення  $\bar{V}_d$  опорних точок дуги на активованих зразках електричних контактів вище, ніж зразках з нікелю чи срібла (рис. 2.23).

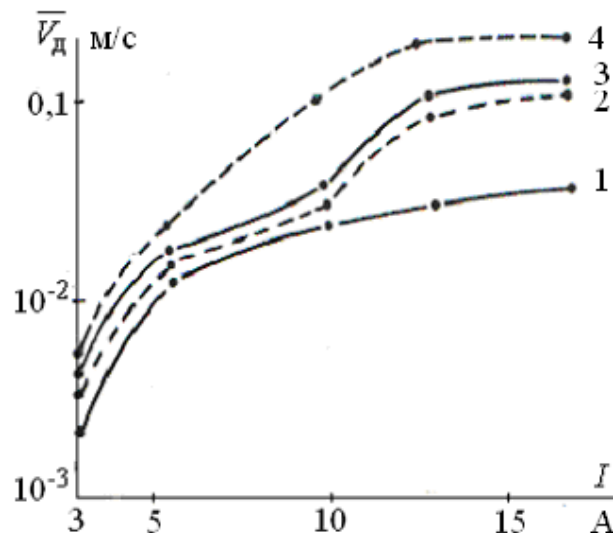


Рисунок 2.23 – Залежність швидкості переміщення опорних точок дуги поверхнею електричних контактів від струму ( $I$ ):

1, 3 – без активної складової; 2, 4 – з активною складовою

Причому зі зростанням струму і напруженості поперечного магнітного поля швидкість переміщення опорних точок дуги збільшується. Випробування

в конструкціях комутаційних електричних апаратів також показали перевагу електричних контактів з активуючою складовою. Наприклад, при пропусканні струмів КЗ (10, 19, 46 кА) через електричні контакти (рис. 2.24) з активуючою складовою та без неї в автоматі – пускачі на номінальний струм 32 А, характер ерозії та, відповідно, знос електричних контактів також різний. Причому електричні контакти без активуючої складової витримали тільки два імпульси струму КЗ (10, 19 кА). Візуально, дослідження зразків електричних контактів показало наступні результати.

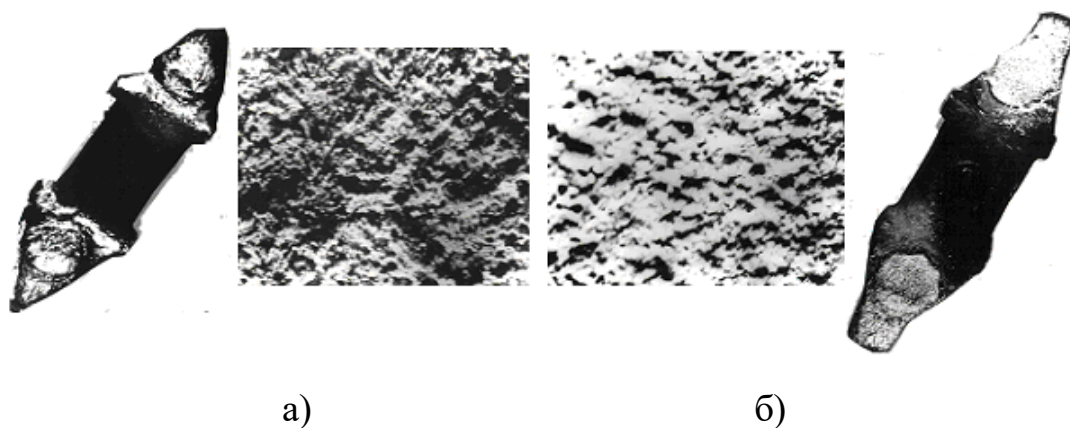


Рисунок 2.24 – Поверхні та зовнішній вигляд контактів після випробування при струмах короткого замикання:

а – контакти без активуючої складової (10, 19 кА); б – контакти з активуючою складовою (10, 19, 46 кА)

Поверхня неактивованих зразків електричних контактів має сліди глибоких кратерів, що говорить про інтенсивну ерозію внаслідок електричного та механічного зношування контактів, а також випаровування складу композиції. Зразки контактів мають оплавлення не тільки робочої поверхні електричних контактів, а й контактоутримувача, що говорить про практично втрачену його форму.

Виходячи з різних видів експериментальних досліджень, очевидно, що ефект активування робочої поверхні електричних контактів дає позитивні результати та підтверджує обґрунтованість вибору елементів складів композицій та напрямків досліджень.

На жаль, проведені експерименти показали, що при подальшій роботі електричних контактів та при всіх видах випробувань було виявлено виснаження активованого шару. Зношування поверхні електродів електричних контактів нічим не відрізняється від зносу контактів без активованого шару.

В результаті, утворюється дендритоподібна поверхня, якою блукає опорна точка дугового розряду. Відповідно, з'явилися сліди глибокої ерозії робочої

поверхні катода електричного контакту, які призводять до інтенсивного зношування та зварювання контактних пар.

Таким чином, отримані результати дослідження та випробування підтверджують, що процесами, що відбуваються на поверхні електричних контактів, можна регулювати. При цьому зменшується зношування, і тим самим, ерозія робочої поверхні композиції електричних контактів, за рахунок введення термоемісійно – активної складової, що призводить до збільшення швидкості переміщення опорних точок дуги, в результаті чого на робочій поверхні утворюються катодні плями I роду. Але, на жаль, зникнення моноатомного активованого шару призводить до зношування та ерозії робочих поверхонь контактів.

Після проведених численних експериментальних досліджень [49] очевидно, що ефект активування працює, тому на базі даного ефекту необхідно шукати інші шляхи зменшення ерозії робочої поверхні електричних контактів за рахунок створення складів композицій з особливими термоемісійними властивостями. А для визначення таких властивостей необхідно провести ряд теоретичних та експериментальних досліджень як елементів, що входять до складу композицій, так і процесів, що відбуваються всередині та на робочій поверхні електричних контактів.

В результаті аналізу теоретичних та експериментальних досліджень, визначено особливості роботи комутаційних апаратів та основні причини розвитку ерозії робочих поверхонь електричних контактів, а також розглянуто різноманітні рішення та методи, що сприяють підвищенню дугостійкості контактних композицій.

1. Аналіз науково-технічної літератури показує, що у характер ерозії контактного матеріалу впливають як теплові і дугові процеси, а й зміна роботи виходу електронів, що визначається мінімальною енергією, яка потрібна на переміщення електронів із поверхні у твердому тілі, долаючи рівні Ферми.

2. Дугостійкість контактної поверхні збільшується зі збільшенням емісійної здатності складів композицій електричних контактів, що сприяє швидкому переміщенню опорних точок дуги робочої поверхні контактів. При цьому на поверхні катода електричного контакту, як правило, утворюються плями I роду, які характеризуються високою рухливістю і малими розмірами. Але, на жаль, немає робіт, які можуть вказати на сталість таких емісійних властивостей, які ініціювали б переміщення опорних точок дуги, і при цьому зменшувалося б знос електричних контактів.

3. Розглянуті моделі процесів, які відбуваються робочих поверхнях

електричних контактів, на жаль, не показують зв'язок між властивістю контактної композиції, теплофізичними параметрами, емісійними явищами тощо. Звичайно, все відразу передбачити і охопити практично неможливо. Тому необхідно створювати розширені моделі, які поєднують багато процесів, що відбуваються як на поверхні електричних контактів, так і всередині самої композиції. Крім того, дані моделі повинні бути побудовані на основі сучасних уявлень про роль атомарних та квантовомеханічних процесів електронної емісії в катодних плямах дуги та на робочій поверхні електричних контактів у цілому.

### **3 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТІВ**

#### **3.1 Основні способи отримання напиленої поверхні**

На сьогоднішній день існує багато різних типів установок призначених для напилення. Зі зміною характеру та збільшенням масштабу виробництва підвищуються потужності і розміри апаратів для напилення, зростає їх виробництво та удосконалюється механізація процесів напилення.

По типу джерела теплової енергії, яка використовується для розповсюдження напилюваного матеріалу, існуючі конструкції апаратів в основному можна розділити на два види: газовогняні та електричні. В газовогняних апаратах використовується теплота, яка виділяється при горінні суміші горючий газ – кисень. Електричні апарати базуються на використанні теплоти електричної дуги.

Найбільш широке застосування знайшов метод газовогняного напилення, який використовується для напилення і подальшого оплавлення покриттів із самофлюсуючих сплавів на основі нікелю та кобальту, а також для напилення керамічних та інших тугоплавких матеріалів. Одним із спеціальних видів газовогняного напилення є напилення, при якому використовується енергія детонації суміші ацетилену з киснем. Цей вид напилення дозволяє наносити покриття із матеріалів з надто високою температурою плавлення.

Із електричних видів напилення найпершим почав застосовуватися метод електродугової металізації. На початку розвитку цього методу при електрометалізації використовували дугу, яка горить на змінному струмі, що не дозволяло отримати стійкий процес розпилення дроту. Зараз в електрометалізаційних апаратах для створення дуги використовують постійний струм, що забезпечує кращу стабільність роботи.

В останні роки були розроблені і почалися застосовуватись у промисловості плазмові розпилювачі і установки для високочастотного індукційного напилення, які в порівнянні з раніше існуючими методами мають більш широкі технологічні можливості для напилення покриттів і деталей практично із будь - якого матеріалу.

### 3.2 Газовогняні напилення

При газовогняному напиленні джерелом теплової енергії є полум'я, яке утворюється в результаті горіння суміші кисень – горючий газ. Напилення, в залежності від стану напилюваного матеріалу, може бути трьох типів: провідникове, пруткове та порошкове. Крім цього, до газовогняного методу відноситься детонаційне напилення, основане на використанні енергії детонації суміші кисень – горючий газ.

#### **Провідникове, пруткове та порошкове газовогняне напилення.**

На рис. 3.1 наведено схему провідникового газовогняного напилення. Пруткове напилення виконується аналогічним чином.

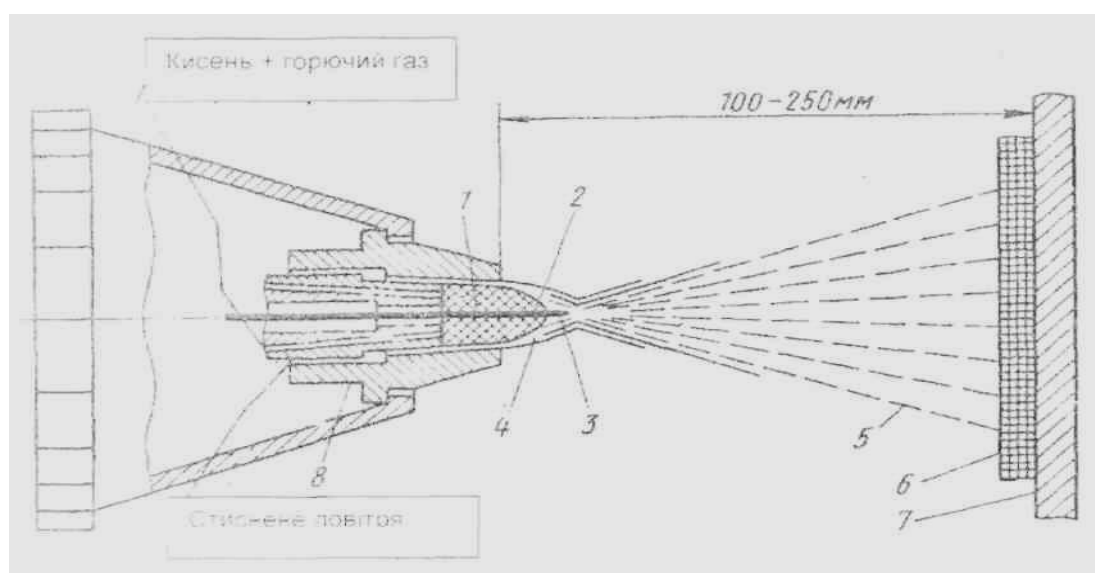


Рисунок 3.1 – Схема провідникового газовогняного напилення

В обох випадках напилюваний матеріал у вигляді провідника або прутка подається через центральний отвір пальника і розплавлюється в полум'ї. Струмінь стисненого повітря розпилює розплавлений матеріал на дрібні частинки, які осідають на оброблену поверхню. Подача провідника відбувається з постійною швидкістю роликками, які приводяться в рух вмонтованою в пальник повітряною турбіною, що працює на стисненому повітрі, яке використовується також для напилення або електродвигуном через редукційний механізм. При цьому необхідне точне регулювання швидкості обертання турбіни чи електродвигуна.

При використанні повітряної турбіни важко виконати точне регулювання швидкості подачі провідника, однак у цьому випадку пальник більш компактний і має менші габарити. Тому повітряні турбіни використовують в пальниках, які призначені для ручного напилення. Пальники з електричним



двигуном дозволяють більш точно регулювати подачу провідника і підтримувати її постійну швидкість. Однак такі пальники мають значну масу, тому їх встановлюють в механізованих установках для напилення. Діаметр напилюваного провідника звичайно не перевищує 3 мм. При напиленні металів з низькою температурою плавлення (алюміній, цинк і ін.) пальниками з підвищеною продуктивністю, діаметр провідника може складати 5 – 7 мм.

Принцип газовогняного напилення порошкового матеріалу заключається в наступному. Напилюваний порошок поступає в пальник зверху з бункера через отвір, розганяється потоком транспортуючого газу (суміш кисень + горючий газ) і на виході із сопла попадає в полум'я, де відбувається його нагрів. Під дією течії гарячого газу частинки порошку потрапляють на напилювану поверхню. В порошкових пальниках, як і в провідникових, подача напилюваного матеріалу в полум'я і розгін утворених розплавлених частинок може відбуватися за допомогою стисненого повітря.

Пальник для напилення порошкового матеріалу представлений на рис. 3.2, а загальна схема пристрою для напилення за допомогою провідника – на рис. 3.3. Редуктор знижує тиск стиснутого повітря, який поступає із повітряної ємкості, до 3,0 – 6,0 кгс/см<sup>2</sup>, а осушувач видаляє із повітря вологу і масло. В більшості випадків в якості горючого газу використовують ацетилен. Можливе також використання пропану, водню або суміші метилу, ацетилену, пропану, яка попередньо піддається стабілізації.

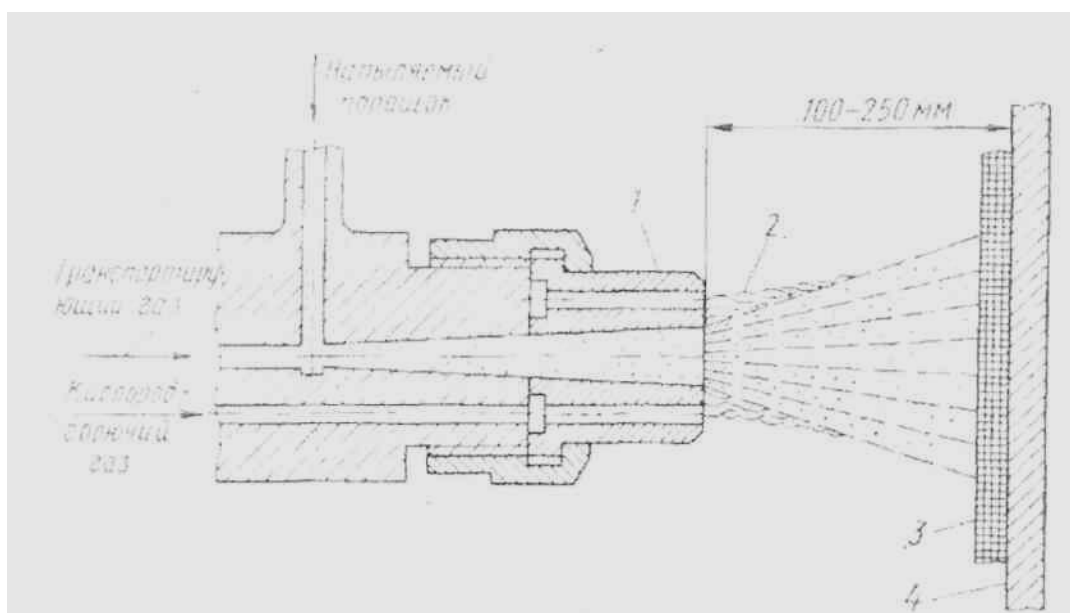
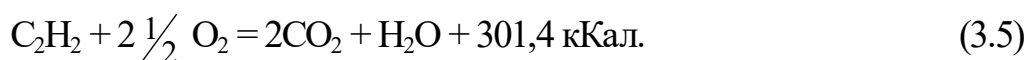
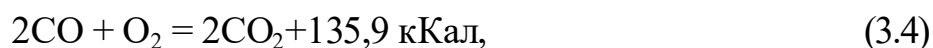


Рисунок 3.2. – Пальник для газоплазмового напилення порошкового матеріалу

При повному згорянні ацетилену протікають наступні хімічні реакції:



Таким чином, для повного згоряння 1 граммамолекули ацетилену необхідно 2,5 граммамолекули кисню. При співвідношенні в суміші кисню до ацетилену рівному 1:1, отримується нейтральне полум'я за рахунок того, що в процесі горіння ацетилену приймає участь також оточуючий атмосферний кисень. На початковій ділянці факела, який утворюється безпосередньо на виході із сопла і має найбільш інтенсивне світіння, протікає реакція (3.1) і (3.2). На цій ділянці газоподібні продукти згоряння мають відновлювальну атмосферу. За межами вказаної ділянки у факелі під дією кисню, який потрапляє із атмосфери, протікають реакції (3.3) і (3.4) та відбувається повне згоряння ацетилену. При русі напилуваних частинок у факелі відбувається їх безперервне нагрівання. При подачі струменю стисненого повітря у факел, як це має місце в пальниках для газовогняного напилення провідника, в результаті наявності великої кількості повітря більша частина полум'я факел є окислювальною.

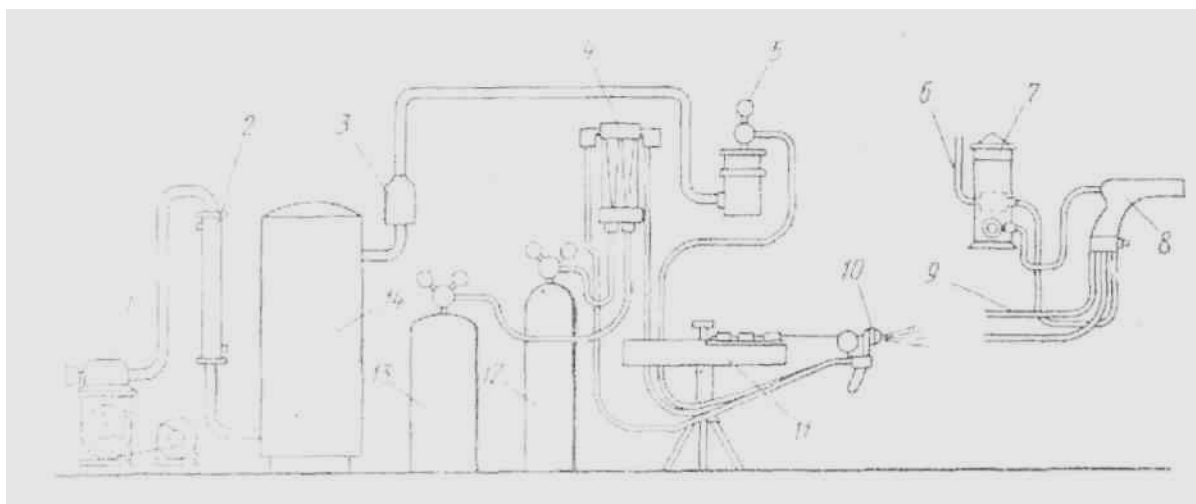


Рисунок 3.3 – Загальна схема пристрою для газоплазмового напилення за допомогою провідника

Температура полум'я газового пальника не перевищує 2850 °С, тому газовогняним напиленням не можна отримати покриття із найбільш тугоплавких матеріалів. Технологія газовогняного напилення досить проста, а

вартість обладнання і затрати на експлуатацію низькі. У зв'язку з цим цей метод є найбільш розповсюдженим.

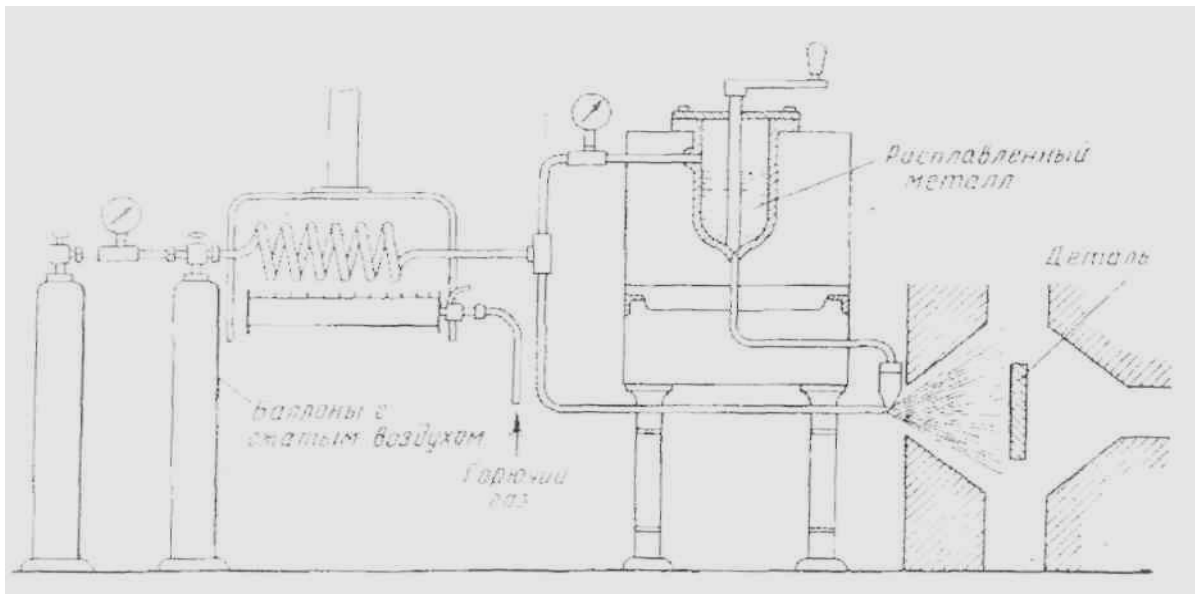


Рисунок 3.4 – Загальна схема пристрою для напилення покриттів із розплавів

**Детонаційне напилення.** Робота пристрою для детонаційного напилення полягає в наступному. В камеру водоохолоджуючого стержня діаметром 25 мм подається кисень і ацетилен у чітко визначених кількостях; стержень направляє на оброблювану деталь. Потім через спеціальний отвір у камері, азотом виштовхують порошок напилюваного матеріалу, наприклад, порошок карбиду вольфрама грануляцією 44 мкм. Газову суміш, в якій у зваженому вигляді знаходиться напилюваний порошок, підпалюють електричною іскрою. В результаті вибуху суміші відбувається виділення теплоти і ударна хвиля, яка розігриває і розганяє частинки порошку.

При детонаційному напиленні частинкам порошку надається більша кінетична енергія. На відстані 75 мм від зрізу стержня швидкість частинок порошку може досягати 820 м/с. Якщо на цій відстані помістити оброблювану деталь, то при попаданні на неї частинок буде виділятися велика кількість теплової енергії і температура напилюваного порошку досягне 4000 °С. Після вибуху суміші горючих газів проводиться продувка стержня азотом для видалення продуктів горіння. Процес відрегульований таким чином, що точно повторюється з частотою 3 – 4 рази за секунду.

Детонаційне напилення призначено в основному для отримання твердих зносостійких покриттів із карбідів, які містять невелику кількість металічних сполук, різних окислів та їх сумішей. За один цикл напилення наноситься покриття товщиною приблизно 6 мкм. Робота установки продовжується до тих

пір, поки не буде досягнута необхідна товщина покриття. На практиці товщина покриття звичайно складає 0,25 – 0,3 мм. Покриття, отримане детонаційним напиленням, має високу густину і велику міцність зчеплення з основою. При напиленні температура основи залишається низькою і не перевищує 200 °С (при напиленні газовогняним пальником температура основи складає 260 – 320 °С). Тому основа практично не деформується і не піддається іншим фізичним змінам.

Недоліком детонаційного напилення є значні шуми, що досягають 140 дБ, тому установку слід розташовувати у спеціальному приміщенні. Інший недолік детонаційного напилення – висока вартість обладнання.

### **3.3. Електричні методи напилення**

Метод електродугової металізації. Принципова схема електродугового металізатора працює таким чином. В лівій частині електрометалізатора встановлені направляючі, через які безперервно відбувається подача двох напилюваних провідників. Між кінцями цих дротів збуджується електрична дуга. В центральній частині електрометалізатора є сопло, через яке подається стиснене повітря. Струмінь стисненого повітря відриває від електрода частинки розплавленого металу і відносить їх до напилюваної поверхні.

Електрометалізатор може працювати як на постійному, так і на змінному струмі. При використанні змінного струму дуга є нестійкою і супроводжується великим шумом. При постійному струмі характер роботи стійкий, напилення матеріалу має дрібнозернисту структуру, продуктивність напилення висока. Тому, на сьогодні для дугового напилення використовують джерела постійного електричного струму. Стабілізація горіння дуги забезпечується підведенням високочастотної напруги. Для напилення використовують провід діаметром 0,8; 1,0; 1,6 і 2,0 мм.

Перевагою методу електродугової металізації є висока продуктивність процесу і можливість значного скорочення затрат часу на напилення. В порівнянні з газовогняним напиленням металізація дозволяє отримати більш міцніші покриття, які краще з'єднуються з основою. При використанні електродів-провідників з двох різних металів можна отримати покриття із їх сплавів. Експлуатаційні затрати електрометалізатора досить невеликі. При напиленні покриття розпиленням двох електродів із різнорідних матеріалів бажано використовувати такі електрометалізатори, які б дозволяли виконувати окремо регулювання швидкості подачі кожного електроду.

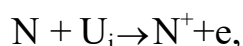
Недоліком вищеназваного методу є перегрівання і окислення напилюваного матеріалу при малих швидкостях подачі розпилювального проводу. Крім того, велика кількість теплоти, яка виділяється при горінні дуги, призводить до значного вигоряння легуючих елементів, що входять до напилюваного складу (наприклад, вміст вуглецю в матеріалі покриття знижується на 40 – 60 %, а кремнію і марганцю – на 10 – 15 %). Це необхідно мати на увазі і використовувати для напилення проводу, що містить велику кількість легуючих елементів. Однак, вартість такого проводу зростає приблизно у 3 рази.

Плазмове напилення. Якщо нагріти газ, молекули якого складаються із декількох атомів, до температури більшої 1000 К, відбудеться процес руйнування молекулярних зв'язків і газ перейде в атомарний стан. Температура цього процесу, який називається дисоціацією, визначається в основному родом газу і тиском. Зміни, що відбуваються при цьому, можна записати, наприклад, для азоту у вигляді наступної реакції:



де  $U_D$  – енергія дисоціації, еВ (електровольт).

В табл. 2.1 наведені значення енергії дисоціації різних газів. При подальшому збільшенні температури від атома відриваються електрони і відбувається його іонізація. При атмосферному тиску і температурі 10000 К такі гази, як кисень і азот, є достатньо іонізованими:



де  $U$  – енергія іонізації одного атома, еВ.

Таблиця 3.1

### Енергія дисоціації молекул різних газів

Газ	Енергія дисоціації, еВ
H	4,477
N <sub>2</sub>	9,76
O <sub>2</sub>	5,08
CO	11,11
NO	6,48
OH	4,37
CO <sub>2</sub>	16,56

В табл. 3.2 наведені значення енергії іонізації для різних елементів. Газ, в якому значна кількість атомів або молекул іонізована і концентрація електронів

та негативних іонів дорівнює концентрації позитивних іонів, називається *плазмою*. Плазма володіє високою електропровідністю.

Таблиця 3.2

### Енергія іонізації різних елементів

Елемент	Ступінь іонізації (кількість відірваних електронів)					
	I	II	III	IV	V	VI
Al	5.984	18.823	28.44	119.96	153.77	190.42
Ar	15.755	27.62	40.90	59.79	75.0	91.3
Ca	6.111	11.87	51.21	67	84.39	
C	11.264	24.376	47.684	64.476	391.986	489.84
Ce	3.893	25.1	-	-	-	-
He	24.580	54.400	-	-	-	-
H	13.595	-	-	-	-	-
Ee	7.90	16.18	30.64	-	-	-
Kr	13.99	24.56	36.9	-	-	-
Mg	7.644	15.03	80.12	109.29	141.23	186.86
Hg	10.44	18.8	-	-	-	-
Nb	6.77	14	-	-	-	-
N	14.54	29.605	47.426	77.450	97.936	551.92
O	13.614	35.146	54.934	77.394	113.873	138.08
Pt	(8.9)	18.5	-	-	-	-
K	4.339	31.81	46	60.90		99.7
Si	8.149	16.34	33.46	45.13	166.73	205.11
Ag	7.574	21.48	-	-	-	-
Na	5.138	47.29	71.56	98.88	138.60	172.36
Sr	5.692	11.027	-	57	-	-
Ti	6.83	13.63	28.14	43.24	99.8	120
W	7.94	-	-	-	-	-
Xe	12.13	21.2	-	-	-	-

Найбільш широко для отримання плазми використовують різні види електричних розрядів в газах, в тому числі і дугової.

При іонізації і дисоціації водню, азоту, а також при іонізації аргону відбувається поглинання енергії. При охолодженні дисоційованого і іонізованого високотемпературного газу відбувається зворотній процес, при

якому електрони об'єднуються з іонами і з атомів утворюються молекули. Ці процеси супроводжуються виділенням енергії іонізації і дисоціації.

Перші досліди по отриманню плазмового струменю були проведені декілька десятків років тому назад французьким фізиком Жердьєном (рис. 3.5). Електрична дуга постійного струму горіла на вугільних електродах, між якими розташовується циліндр, в який з закруткою (через тангенціально просвердлені отвори) подається вода таким чином, що по центральній осі утворюється повітряна порожнина. Стабілізація дуги проводилась в цій порожнині за рахунок стискаючого руху водяного вихору. Температура дуги досягала 50000 К. Плазмові струмені витікали із циліндра в напрямку до електродів. Під дією струменів води електроди швидко зношувались і час існування плазми був досить невеликим.

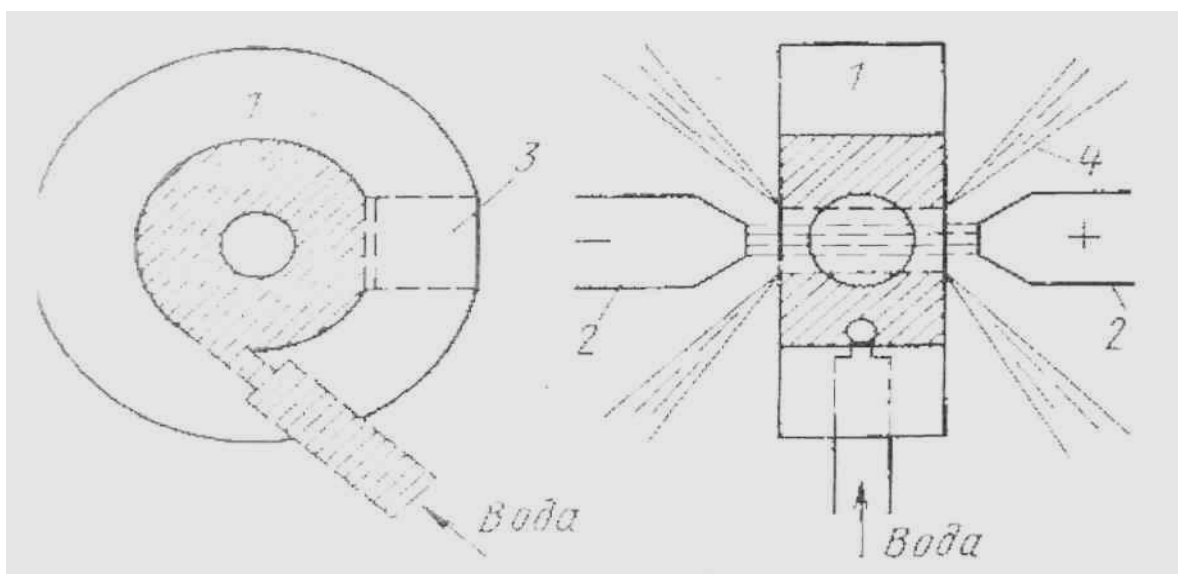


Рисунок 3.5 – Плазматрон Жердьєна

Розвиток технології зварювання вольфрамовими електродами в середовищі інертних газів і пов'язане з цим процесом вивчення явищ, які відбуваються при горінні дуги між нерозплавлюваними електродами і зварюваним металом; використання у промисловості нових методів обробки матеріалів при надвисоких температурах, а також прогрес науки у вивченні фізики плазми – все це сприяло створенню в кінці 50<sup>х</sup> років минулого століття плазмових розпилювачів.

В даний час в промисловості для отримання плазми використовують два типи пальників: плазмово-дуговий і плазмово-струменевий (рис. 3.6) В плазмово-дуговому пальнику електрична дуга горить між анодом, яким є оброблюваний матеріал або експериментальний зразок, і катодом, виготовленим із вольфрамового сплаву, який містить приблизно 2 % торію.

Дугу стабілізує закручений потік робочого газу, що витікає із сопла пальника. В плазмово-струменевому пальнику дуга утворюється між вольфрамовим катодом і анодом, який є мідним соплом, що охолоджується водою. Дуга нагріває до високої температури робочий газ, який подається з закруткою в камеру пальника, який витікає із сопла у вигляді плазмового струменю. Подача робочого газу з інтенсивною закруткою в камеру пальника надає стабілізуючої дії на процес горіння дуги і підвищує її температуру.

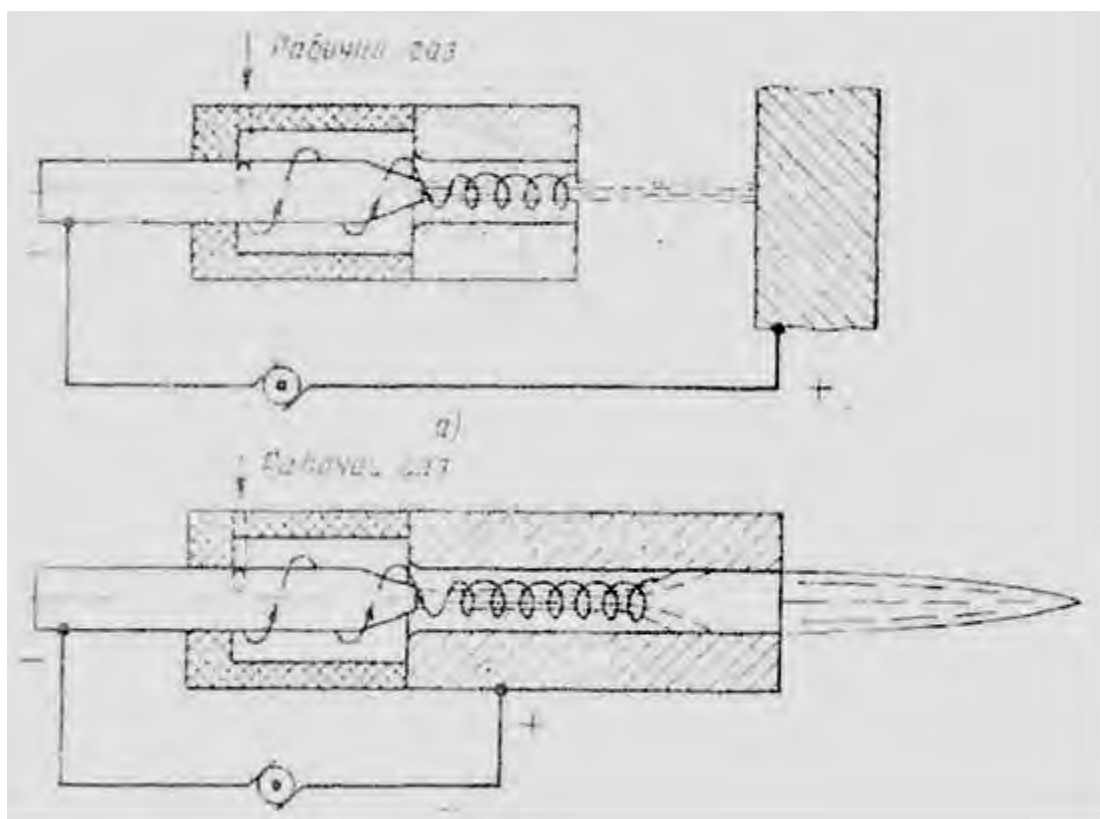


Рисунок 3.6 – Плазмово-дуговий (а) і плазмово-струменевий (б) пальники

Крім вказаних типів плазмових пальників існують ще плазмові пальники проміжного типу. В цьому випадку дуга утворюється між катодом, внутрішньою поверхнею сопла – анода пальника – і оброблюваною деталлю.

Такі пальники з складною дугою використовують для наплавки і зварювання.

Плазмові пальники дозволяють легко отримати плазмовий струмінь, середня температура якого на виході із сопла складає декілька тисяч градусів. Така температура є достатньою для розплавлення будь-яких речовин, існуючих в твердому стані. При напиленні на поверхню деталі розплавлення і термічна деформація небажані. Тому, звичайно для напилення використовують плазмово-струменеві пальники (плазмові розпилювачі).



Для напилення використовують порошок з частинками розміром 40 – 100 мкм. Були створені експериментальні конструкції, в яких напилюваний порошок подавався робочим газом в камеру розпилення, а також розпилювачі, в яких напилюваний матеріал подавався у вигляді проводу, де відбувалось його розплавлення. Однак, ці системи не знайшли практичного застосування.

Напилення плазмовим струменем має наступні особливості. Висока температура плазмового струменя дозволяє порівняно легко виконати напилення тугоплавких матеріалів. Температуру струменю можна змінювати в широкому діапазоні, підбираючи діаметр сопла і режим роботи розпилювача. Це дозволяє виконувати напилення різних матеріалів (металів, кераміки та органічних матеріалів). Оскільки як робочий газ використовується інертний газ, в напилюваному покритті утворюється порівняно невелика кількість окислів. У випадку необхідності, напилення можна виконувати в ємкості, заповненій інертним газом

Покриття, отримані методом плазмового напилення, володіють високою щільністю і добрим зчепленням з основою. Але плазмове напилення має порівняно низьку продуктивність, супроводжується шумом та сильним ультрафіолетовим випромінюванням. До недоліків цього методу можна віднести високу вартість обладнання і його експлуатаційні затрати.

#### **3.4. Характеристика обладнання для електротермічної технології напилення**

Основними технологічними параметрами плазмового способу напилювання є:

- склад порошкового матеріалу;
- потужність дуги;
- витрата плазмо утворюючого газу;
- витрати газу на подачу порошку;
- розмір його часток;
- кут зустрічі потоку часток з поверхнею напилювання;
- дистанція напилювання;
- швидкість переміщення плями напилювання.

Установка для плазмового або дугового напилювання складається з джерела живлення, механізму подачі розпиленого матеріалу, системи подачі газу, пульта керування і розпилювачу (плазмотрону).

При плазмовому напилюванні дуговий розряд збуджується і горить в замкненому об'ємі між електродами, які не розплавляються, при інтенсивному охолодженні стовбуру потоком плазмоутворюючого газу. Створюються сприятливі умови для стискання дуги. Статистична вольт-амперна характеристика її, як правило, знаходиться на зростаючій вітці залежності  $U=f(I)$  (рис. 2.7, ділянка 1).

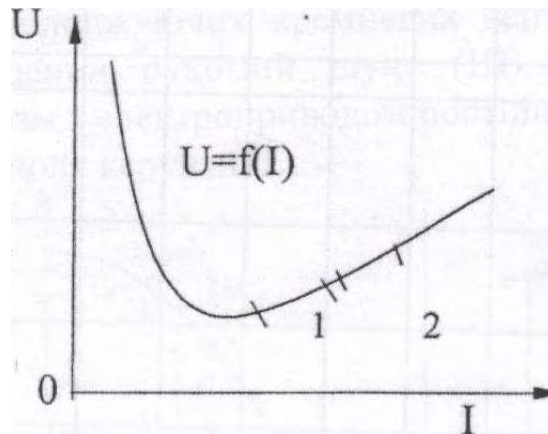


Рисунок 3.7 – Статична вольт-амперна характеристика дуги при різній густині струму:

1 – ділянка, котра характерна для дуги, що горить в плазмотроні; 2 – те ж саме при дуговій металізації.

Напруга для запалювання дуги (холостий хід) в залежності від умов газоплазмового напилювання складає 40 – 90 В. Невисокі значення  $U_0$  необхідні при роботі з аргоном (40 – 60 В), значно більш високі - при використанні азоту (80 – 90 В) і аргано-водневої суміші (60 – 70 В).

Для реалізації великої потужності дуги, що необхідна для плазмоутворення, вимагаються більші значення струму. Виходячи з цього, джерела живлення для газоплазмового напилювання повинні бути високоамперні з широким діапазоном регулювання струму (100 – 1000 А).

Умови горіння дуги в плазмотронах досить стабільні. Довжина дуги і витрата плазмоутворюючого газу змінюються незначно. Завдяки цьому відпадає необхідність у високих динамічних властивостях джерела, під якими в першу чергу, розуміють швидкість зміни струму і напруги при зміні довжини дуги, складу і витрати плазмоутворюючого газу.

При дуговій металізації дуга збуджується і горить між електродами, які розплавляються. На стовбур дуги безперервно діє потік стисненого газу, котрий визначає циклічність її горіння. Аналіз знятих нами осцилограм, дозволяє виділити дві досить виражені полоси частот при живленні дуги постійним

струмом. Низькочастотні коливання складають 250 – 2500 Гц, високочастотні –  $(50 - 100)^{-10}$  Гц. Статична вольт-амперна характеристика  $U > U_i$  (інтегральна робоча характеристика) розміщена також на зростаючій вітці залежності  $U=f(I)$  (рис. 3.8, ділянка 2).

Для запалювання дуги необхідна порівняно невисока напруга, яку можна прийняти як наближену до напруги горіння дуги. На практиці горіння дуги відбувається при нарузі 20 – 40 В. Отже, для дугової металізації потрібні джерела з невисокою напругою холостого ходу ( $U_0 = 30 - 40$  В). Продуктивність при напилюванні залежить, головним чином, від сили струму дуги. Тому, необхідні високо амперні джерела живлення з величиною струму  $I = 300 - 1000$  А і плавним його регулюванням в широкому діапазоні.

Циклічність горіння дуги вимагає джерел живлення з високими динамічними властивостями. Наприклад, швидкість підвищення напруги  $dU/dt$  за цикл повинна бути максимальною. Швидкість підвищення струму  $dI/dt$  також повинна бути високою (природно 500 – 1200 кА/с).

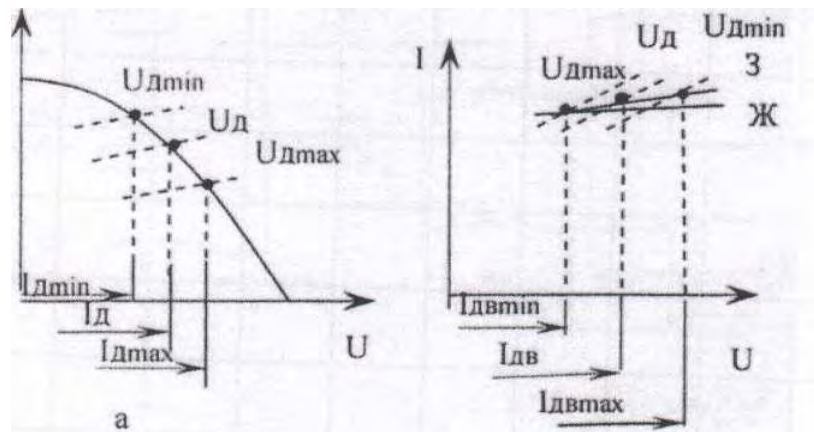
Стабільність процесу при електродуговій металізації в загальному визначається саморегулюванням дуги. Принцип саморегулювання полягає в тому, що швидкість плавлення електродів змінюється при зміні довжини дуги. З цим пов'язана зміна струму. Так, при збільшенні довжини дуги струм зменшується. При цьому зменшується швидкість плавлення проводу. При постійній швидкості її подачі довжина дуги відновлюється. Навпаки, зменшення довжини дуги призводить до зростання струму і швидкості плавлення, відповідно збільшується і довжина дуги.

Для живлення дуги при плазмовому і дуговому напилюванні використовуються наплавочні (зварювальні) перетворювачі та напівпровідникові випрямлячі. У відповідності до рекомендацій [127, 118] для живлення дуги в плазмових розпилювачах доцільно застосовувати джерела з крутоспадаючою зовнішньою характеристикою. В цьому випадку при коливаннях напруги дуги величина зміни струму буде змінюватися незначно (рис. 3.8 а). Інші зовнішні характеристики джерела спричинюють великі коливання струму (рис. 3.8 б).

Для живлення дуги при електродуговій металізації необхідно джерела з жорсткими і зростаючими ВАХ. Коливання довжини дуги супроводжується різкими змінами струму (рис. 3.8 б). Це позитивно впливає на саморегуляцію дуги і стабільність процесу напилювання.

Як джерело живлення для плазмового напилювання нами був прийнятий випробуваний випрямляч з трансформаторним регулятором струму

ИПН-160/600 (рис. 3.8 а). Трансформатор Т підключають до мережі через силовий контактор КС Первинна обмотка трансформатора секційна. Це дозволяє ступінчато встановлювати потрібні значення напруги холостого ходу (наприклад, у випадку застосування різноманітних плазмотворюючих газів).



а

б

Рисунок 3.8 – Коливання струму при зміні напруги і довжини дуги:

а – крутоспадаюча зовнішня характеристика джерела живлення;  
 б – жорстка (Ж) і зростаюча (З) зовнішні характеристики джерела живлення

Напруга із вторинної обмотки подається на діодний випрямляючий блок V, який зібраний за трифазною мостовою схемою із водоохолоджуючих кремневих вентилів ВВ-500. У вікнах магнітопроводу розміщений рухомий шунт (Ш). Для його переміщення передбачений механізм з електроприводом постійного струму (рис. 3.8 б). Двигун шунта, як і інші кола керування джерелом, живиться від окремої схеми напругою 220 В. Якір двигуна шунта ЯДШ і його обмотка збудження ОВДШ живляться від знижувального трансформатора (Ті) через однофазний випрямляч. Напрямок руху шунта (реверс) встановлюється тумблерами П2 і П2В. В схемі передбачені вимикачі ВК1 і ВК2. Керування джерелом здійснюється за допомогою кнопок завдяки проміжним реле РП.

Перевагами джерела живлення ИПН-160/600 є простота конструкції, надійність, довговічність, невисока вартість. В експлуатації він легко монтується та ремонтується. Недоліком джерела є відсутність системи автоматичного регулювання заданих параметрів режиму горіння дуги ИПН-160/600 відноситься до першого покоління спеціалізованих джерел для газоплазмового напилювання.

Зараз замість ИПН-160/600 все частіше застосовується тиристорний випрямляч ВПН-160/630, який відзначається повітряним охолодженням,

вмонтованим осцилятором для підпалювання дуги, двоступеневим регулюванням напруги холостого ходу та струму.

При дуговій металізації, з урахуванням раніше сформульованих вимог, дозволяється застосовувати джерела живлення, що призначені для механізованої дугової наплавки (зварювання) в середовищі захисних газів електродами, що плавляться. Вони, як відомо, мають невисокі напруги холостого ходу, пологоспадаючі або жорсткі характеристики та мають високі динамічні характеристики. Найбільш доцільно використовувати джерела випрямленого струму. Також можна застосовувати і зварювальні перетворювачі, наприклад ПСГ-350, ПСГ-500.

Поряд з джерелом живлення самостійну функцію виконує блок, що об'єднує елементи механізму подачі розпиленого матеріалу. Зупиняючись на технології напилювання з використанням проводу, стержнів, необхідно зауважити, що в даному випадку велику роль відіграють рівномірність подачі та фіксоване положення їх розплавленого кінця. Тому, в механізмах подачі передбачені пристрої для направлення проводу. Механізм розміщують або в одному корпусі з розпилювачем або окремо. В першому випадку використовують тягучий принцип подачі проводу, в іншому – штовхаючий у направляючих каналах. Для роботи механізму подачі використовують пневмо- або електропривод. Пневмопривід застосовують тільки для ручних апаратів, де розпилення проводу відбувається за допомогою стисненого повітря. До пневмоприводу вмонтовують малогабаритну турбінку або ротаційний двигун.

На відміну від пневмоприводів електроприводи значно простіші при виготовленні. їх використовують як комплектуючі вироби з можливістю легкої заміни. Стаціонарні установки для напилювання містять в механізмах подачі проводу тільки електропривод. По гнучким шлангам (направляючим каналам) дріт подається від механізму подачі до розпилювачів. При цьому відстань між ними може досягати 3 м і більше. При подачі тонкого проводу доцільно використовувати механізми тягучого типу, закріплюючи їх безпосередньо на розпилювачі. Товстий дріт подають механізмами штовхаючого типу, відділяючи його від розпилювача.

В електроприводах в основному застосовують двигуни постійного струму. При цьому використовують нерегулюючий редуктор або регулюючий з невеликою кількістю ступенів. Швидкість подачі проводу регулюємо, змінюючи напругу на обмотці якоря двигуна. Для цього застосовуємо автотрансформаторні та тиристорні регулятори напруги (РН).

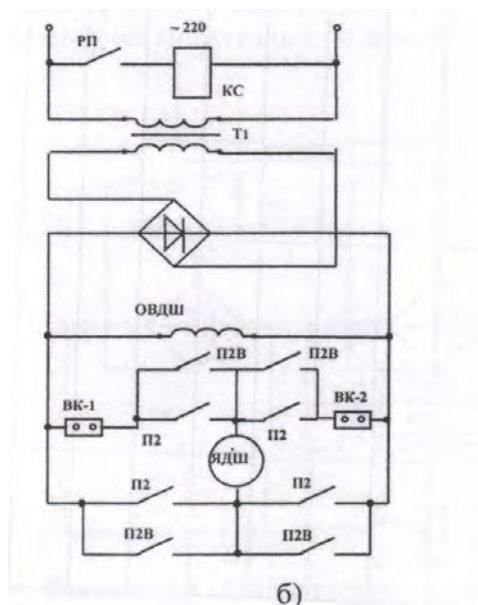
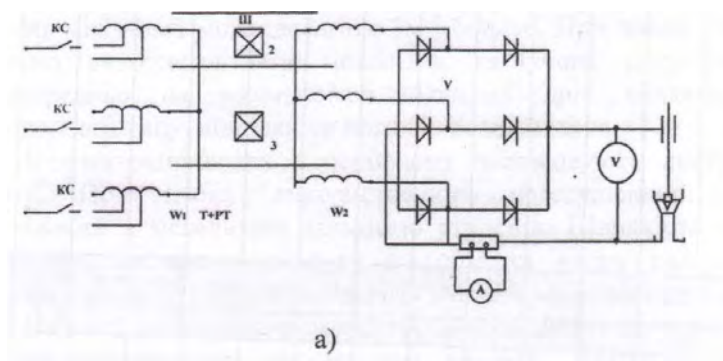


Рисунок 3.9 – Електрична силова схема ІПН-160/600 (а) і схема кола керування (б)

На рис. 3.10 показана схема керування двигуном постійного струму з автотрансформаторним регулятором напруги. Елементи електроприводу живляться від знижувального трансформатора Т. Від випрямляча обмотки якоря ВЯО напруга через реле РП подається на обмотку якоря двигуна механізму подачі ДМП. Він регулюється регулятором напруги РН. Живлення обмотки збудження ОВДМП відбувається від випрямляча ВОВ. Від нього живляться допоміжні елементи: котушки реле РП дроселю ДР, кнопки “Пуск” (П) і “Стоп” (С). Подача проводу починається натисканням кнопки “Пуск”. Широкого розповсюдження в електроприводах набули схеми з регулятором напруги тиристорного типу. Використовуючи фазоперетворюючі та інші способи, регулюємо напругу, яка подається на ДМП. В іншому робота схеми аналогічна раніше розглянутій.

При газоплазмовому напилюванні газу виконують ряд функцій: розпилення і прискорення напилених часток, джерело теплоти у поєднанні з розпиленням і прискоренням, транспортування порошку в зону нагрівання і прискорення тощо. Живлення газом відбувається від компресорних станцій

(установок), заводських газових магістралей, балонних рамп і окремих балонів. Джерело живлення газом вибирають в залежності від об'ємів напилювання. В установках для газоплазмового напилювання є блок живлення газом і газорозподільний пульт з апаратурою контролю і керування.

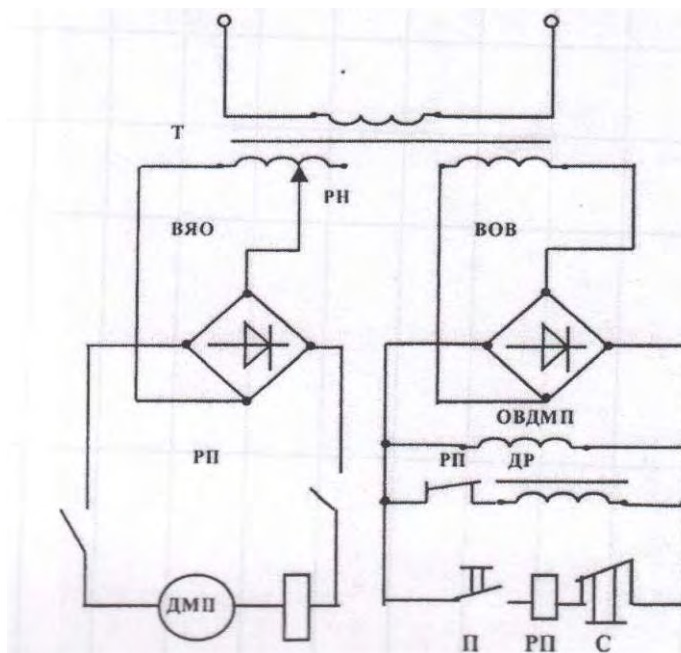


Рисунок 3.10 – Схема електроприводу

Найпростіша схема живлення газом при подачі в зону нагрівання розпилюючого апарату стисненого газу, котрий виконує тільки функції розпилення (рис. 3.11 а), характерна для дугової металізації. Від спеціального компресора або заводської мережі повітря подаємо в ресивер, який забезпечує згладжування пульсацій повітряного потоку при розпиленні провідникових електродів. З ресивера стиснене повітря направляється в газову магістраль, яка складається із запірною вентиля 1, регулюючого газового редуктора 2, ротаметра 3 і маслководвідділювача 4, а потім – до розпилювачу.

Більш складні схеми живлення, коли гази виконують декілька функцій, наприклад, перетворення електричної енергії в теплову у вигляді плазмового струменю, подача порошку, а інколи і захист процесу напилювання. На рис. 3.11 б наведена схема живлення газом з подачею плазмоутворюючого і транспортуючого газів. Стиснені гази від рампі або одинарних балонів подаємо до розпилювачу через запірно-регулюючі вентиля 1 і вимірювальні ротаметри 3. Тиск газів контролюється манометром 5. Специфічним елементом є рампа, в якій об'єднані балони зі стисненим газом. Балони з однаковим газом підключені до загального трубопроводу. В газову магістраль стиснений газ надходить через рамповий редуктор. Для газоплазмового напилювання, як правило,

використовуємо стиснені гази (аргон, азот, водень тощо), що постачаються в балонах об'ємом 40 л під тиском до 20 МПа (ГОСТ 949-73).

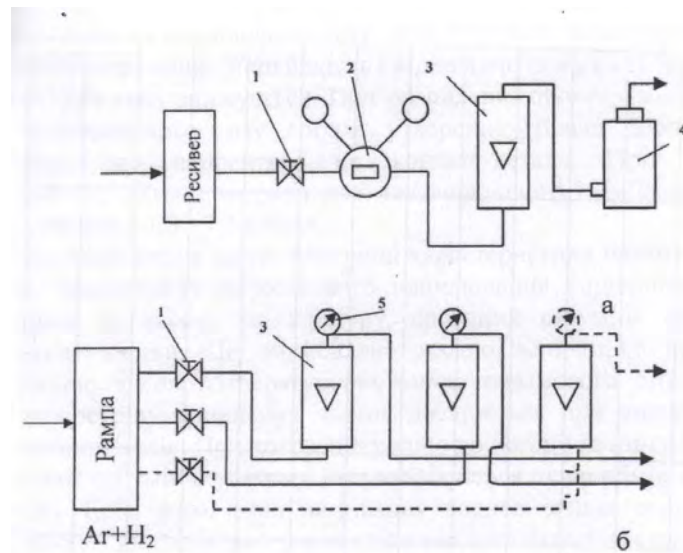


Рисунок 2.11 – Схеми подачі розпилюючих газів:

а – стисненого повітря; б – плазмоутворюючого і транспортуючого газів

Зі збільшенням потужності дуги інтенсивно збільшуються температура і ентальпія плазмового потоку як на зрізі сопла, так і в інших її перерізах. Потужність дуги визначається напругою та силою струму. Напруга залежить від довжини дуги, що в свою чергу визначається конструкцією розпилювача, видом та витратою плазмоутворюючого газу. При реалізації заданої потужності дуги необхідно вибрати режим роботи з максимальною напругою. Залежність продуктивності напилювання порошків самофлюсуючих сплавів від потужності дуги наведена на рис. 3.12.

При витраті плазмоутворюючого газу вище оптимальних значень суттєво знижується густина покриття, зменшуються коефіцієнт витрати порошку та інші показники ефективності напилювання. Із збільшенням витрати плазмоутворюючого газу підвищується розпилювальна здатність плазмового струменю, її швидкість і відповідно швидкість напилених часток, температура яких знижується. При розпиленні проводу збільшення витрати плазмоутворюючого газу сприяє утворенню більш дисперсного потоку матеріалу, що наноситься на контакт-деталь. При газоплазмовому напилюванні об'ємні витрати плазмоутворюючого газу складають 2,0 – 4,0 м<sup>3</sup>/год, масові – 1,8 – 7,2 кг/год.



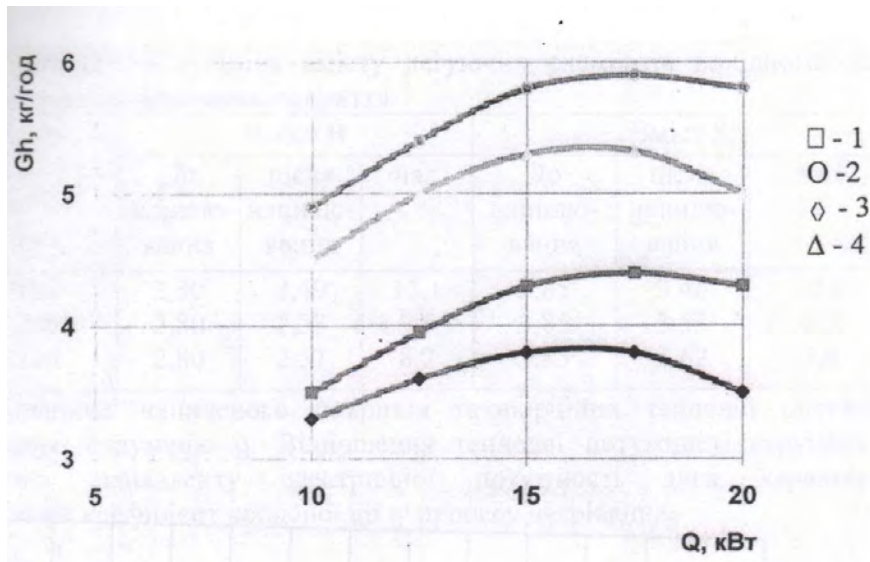


Рисунок 3.12 – Залежність продуктивності процесу напилювання від потужності дуги плазмотрону:

1 –  $d = 160 - 200$  мкм, витрата плазмоутворюючого газу  $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 2 –  $d = 160 - 200$  мкм, витрата газу  $0,0012 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 3 –  $d = 250 - 300$  мкм, витрата газу  $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 4 –  $d = 160 - 200$  мкм, витрата плазмоутворюючого газу  $0,0012 \text{ м}^3/\text{с}$

Великий вплив на теплофізичні характеристики плазмового струменя в умовах теплообміну порошкового напилювання спричинює вид газу. Не дивлячись на високу температуру, аргонний струмінь слабо розігріває порошкові частки. Це обумовлено малою величиною критерію Біо та скороченою високотемпературною зоною плазмового струменя. Великий ступінь прогріву напилених часток досягається при використанні азоту і водневмісних газів. При додаванні водню до аргону та азоту можна одержати плазмовий струмінь, у якому інтенсифікується теплообмін між порошком і плазмою. Крім того, зона нагрівання водневмісних струменів є досить протяжною. Збільшується час нагрівання напилених часток і відповідно їх ентальпія.

Витрата газу на подачу порошку складає близько 10 % витрати плазмоутворюючого газу. Зростання витрати транспортуючого газу полегшує і стабілізує подачу порошку. Разом з тим спостерігаємо зміщення потоку часток щодо плазмового струменя. При цьому дуже знижується температура, зменшується швидкість руху часток і коефіцієнт використання порошкового матеріалу.

Швидкість подачі порошку звичайно оцінюємо за його витратою, вона складає  $0,9 - 7,2$  кг/год. Підвищена кількість порошку, який подаємо до

плазмового струменю, зменшує теплову енергію для нагрівання напиленої частки. При цьому знижується ефективність процесу. Для подачі порошку використовують гази, аналогічні плазмо утворюючим. Можна використовувати й інші гази з різними фізико-хімічними властивостями.

Для плазмового напилювання застосовуємо порошок із середнім діаметром часток 10 – 200 мкм. Зі збільшенням їх розміру виникають труднощі при нагріванні до температури плавлення. Особливо складно проплавляти великі частки тугоплавких матеріалів з низькою теплопровідністю або малою густиною, наприклад оксидів цирконію, магнію, карбїду титана. У результаті погіршуються показники процесу напилювання. Однак, напилювання крупних фракцій дозволяє знизити чад легуючих елементів при нанесенні покриття. Це підтверджено експериментальними дослідженнями. Отримані дані представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

**Зміна вмісту легуючих елементів вихідного складу –  
напилюванні покриття**

Діаметр напилених часток, мкм	Вміст В			Вміст Si		
	до напилювання	після напилювання	чад	до напилювання	після напилювання	чад
100 – 160	2,80	2,49	11,1	3,85	3,46	10,1
200 – 250	2,80	2,53	9,6	3,85	3,53	8,3
250 – 300	2,80	2,57	8,2	3,85	3,62	5,6

Для газоплазмового напилювання оптимальна дистанція дорівнює 50 – 300 мм. Надмірно малі дистанції напилювання, що близькі до довжини початкової ділянки плазмового струменя, не завжди забезпечують прогрівання порошкових часток і необхідну швидкість їх руху. Разом з тим зростає небезпека неприпустимого нагрівання контакту. Зі збільшенням дистанції різко знижуються температура і швидкість плазмового струменя на основній ділянці (рис. 3.13). Спостерігається зниження температури і швидкості напиленних часток. Найбільші дистанції напилювання вибирають при використанні ламінарної плазми або в тому випадку, коли процес протікає в низькому вакуумі. Істотно зростає дистанція напилювання зі збільшенням потужності дуги при використанні газів з високою ентальпією.

Товщина напиленого покриття пропорційна тепловій потужності плазмового струменю  $q$ . Відношення теплової потужності струменю до

теплового еквіваленту електричної потужності дуги характеризує ефективний коефіцієнт корисної дії  $\eta'$  процесу нагрівання:

$$\eta' = \frac{q}{UI}, \quad (3.6)$$

де  $U, I$  – напруга та струм електричної дуги, Т, К

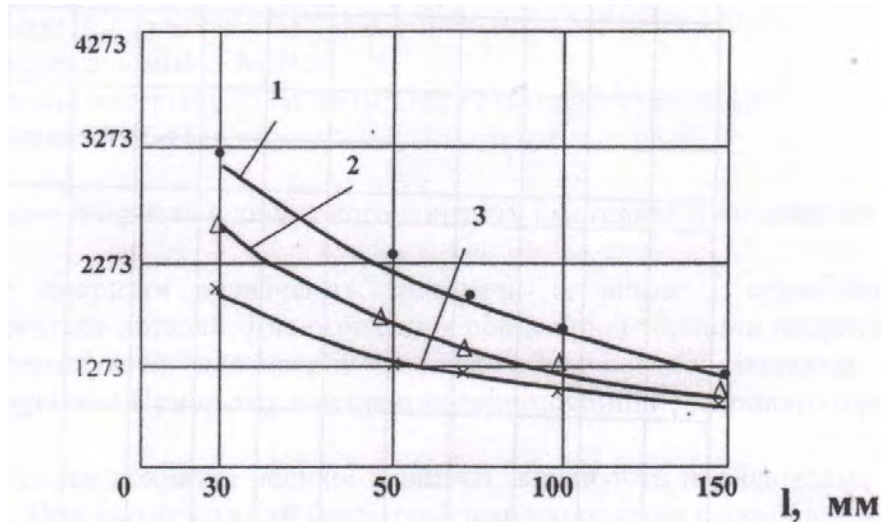


Рисунок 2.13 – Криві розподілення температури плазмового струменю від дистанції напилювання:

1 – сила струму дуги 500А; 2 – сила струму 455А; 3 – сила струму 300 А (робочий газ – аргон, 1,8 м/год)

Експерименти показують, що ефективний ККД при газоплазмовому напилюванні залежить від напруги дуги і може коливатися в межах – від 0,35 до 0,90 (рис. 3.14). Збільшення довжини дуги, що призводить до зростання напруги дуги різко знижує ефективність нагрівання. Наприклад, при розпилювання цинку  $\eta'$  складає 0,9 при напрузі ЦК20В, в іншому випадку при напрузі 60В ККД знижується до значення 0,4. Виміри показують, що сума анодного і катодного спаду напруги в цьому процесі складає 19,09 – 99 В. Таким чином, при зменшенні довжини дуги основним джерелем нагрівання стають активні плями дуги, використання яких підвищує ефективність напилювання.

### 3.5 Товщина покриття відновленого контакту і методика її визначення

Товщину покриття визначають, виходячи із вимог і службових властивостей контакт-деталей. Для отримання рівномірної товщини покриття

необхідно переміщувати плазмотрон вздовж оброблюваної поверхні з постійною швидкістю. При цьому напилені полоси повинні перекривати одна одну.

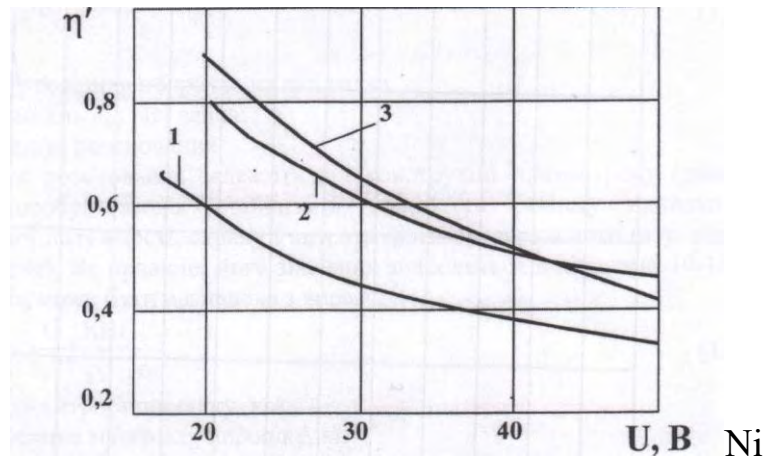


Рисунок 3.14 – Залежність ефективного ККД нагрівання  $\eta'$  від напруги дуги плазмотрону:

1 – напилення алюмінію А-99; 2 – напилення матеріалу 85% Cu+10 % Мо + 2 % МоО<sub>3</sub> + 1 % С + 2 % Ni; 3 – напилення СОК-15

Щоб отримати покриття великої товщини, виконують напилювання в декілька шарів. При цьому кожний наступний шар наноситься переміщенням апарату в напрямку, що перпендикулярний напрямку попереднього нанесення. Товщина нанесених покриттів регулюється кількістю проходів. За кожний прохід можна напилювати шар, товщина якого в залежності від швидкості переміщення плазмотрону може коливатися в межах 0,03 – 0,2 мм.

Товщина шару в різноманітних покриттях коливається в дуже широким межах і залежить від призначення покриття, технології його нанесення, матеріалів, що входять до складу покриття тощо. Найбільше зустрічаються покриття з товщиною одного шару від 10 до 100 мкм.

Нанесення покриття на задану площу контакт-деталі відбувається за рахунок лінійного переміщення контакт-деталі або з поперечним зміщенням плазмотрону. При однократному лінійному переміщенні плазмотрону лінійний матеріал утворює валок покриття, поперечний переріз якого утворюється кривою Гауса:

$$h = h_0 e^{-\frac{r^2}{r_0^2}}, \quad (3.7)$$

де  $h$  – товщина покриття на вісі валка;  $r$  – відстань від вісі валка;  $r_0$  – радіус розсіювання.

Радіус розсіювання залежить від конструкції плазмотрону (діаметру аноду, способу газової стабілізації тощо) та режиму напилювання (електричної потужності, складу і витрати плазмоутворюючого газу, відстані напилювання). Як правило, його значення знаходиться в діапазоні 10 – 15 мм. Величина  $h_0$  може бути визначена з виразу:

$$h_0 = \frac{G_n K B \Pi}{1,77 \rho \cdot \omega_n \cdot r_0}, \quad (3.8)$$

де  $G_n$  – витрата порошку, кг/с;  $\rho$  – густина матеріалу порошку, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega_n$  – швидкість лінійного переміщення плазмотрону, м/с. За межу валка приймають точку, де товщина покриття складає  $0,05h_0$ , тобто ширина валка з виразу (3.7) дорівнює  $1,73r_0$ . В результаті накладання одинарних валків утворюється суцільне покриття, геометричні характеристики якого (середня товщина та хвилястість) пов'язані з параметрами керування формою. До числа цих параметрів відносяться лінійна швидкість руху плазмотрону  $\omega_n$ , поперечне зміщення (або крок напилювання)  $s$ , витрата порошку  $G_n$ .

Товщина покриття в будь-якій точці поперечного перерізу  $\delta(x)$  ( $x = 0$  на вісі першого валка) при накладанні  $n$  валків з кроком  $s$ :

$$\delta(x) = \frac{G_n K B \Pi}{\sqrt{\pi} \rho \omega_n r_0} \cdot \sum_{i=1}^n e^{-\frac{[x-(i-1)s]^2}{r_0^2}}, \quad (3.9)$$

При цьому:

$$\delta_{\max} = \frac{G_n K B \Pi}{\sqrt{\pi} \rho \omega_n r_0} \cdot \left( 1 + 2e^{-\frac{s^2}{r_0^2}} \right), \quad (3.10)$$

$$\delta_{\min} = \frac{G_n K B \Pi}{\sqrt{\pi} \rho \omega_n r_0} \cdot \left( e^{-\frac{s^2}{r_0^2}} + e^{-\frac{9s^2}{4r_0^2}} \right). \quad (3.11)$$

Таким чином, відносна хвилястість покриття в значній мірі залежить від співвідношення  $s/r_0$ . При  $s/r_0 \leq 1,2$  хвилястість менше 1 %, а При  $s/r_0 = 1,6$  – досягає 8 %.

Необхідну товщину напиленого покриття визначають, виходячи з товщини робочого шару, допуску на наступну обробку і допуску на розміри контакт-деталі і товщину напиленого шару. Товщина напиленого покриття на

контактах, у яких відновлюються втрачені розміри, повинна передбачати допуск на наступну їх обробку: токарну і шліфувальну.

Методика розрахунку товщини покриття з урахуванням допусків на обробку викладена нижче і зображена на рис. 3.15. Товщина покриття  $h$ , яка нарощується на зовнішню поверхню, може визначатися за формулою

$$h = (L - d) + b, \quad (3.12)$$

де  $L$  – номінальна товщина контакту;  $d$  – товщина контакту після підготовки до напилювання;  $b$  – допуск на обробку після напилювання. Для забезпечення необхідної міцності покриття його товщина після кінцевої обробки  $h_{min}$  не повинна бути меншою визначеної величини [90]. В табл. 3.4 показано, що ця величина, в залежності від товщини контакт-деталі електромагнітного пускача ПМЛ-1200.04 знаходиться в межах від 0,6 до 1,0 мм.

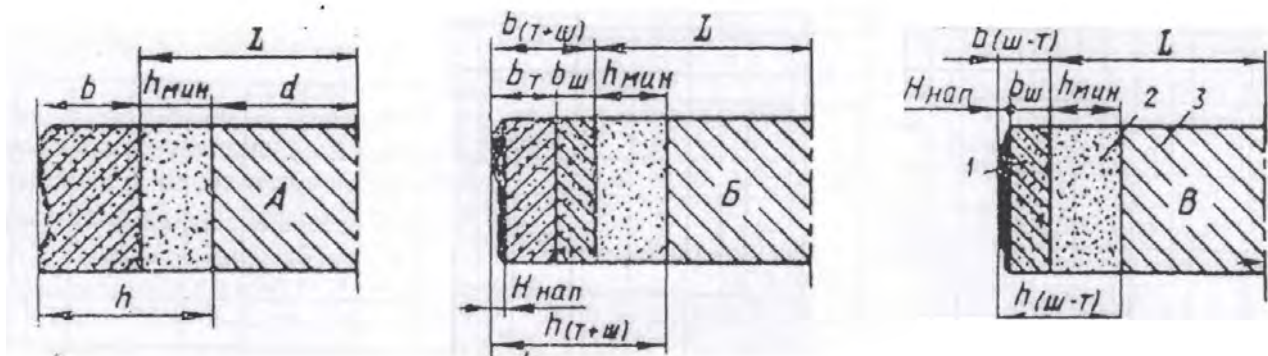


Рисунок 3.15 – Схеми до розрахунку товщини покриття контакту з урахуванням допусків на обробку:

1 – допуск на обробку; 2 – напилений шар покриття, який залишається після обробки; 3 – основний метал деталі

Для токарної обробки напилених контакт-деталей покриття наноситься з допуском  $b_T$ , який залежить від товщини деталі і, крім того, обумовлюється ступенем нерівномірності покриття по товщині. Допуск  $b_T$  знаходиться в прямій залежності від висоти нерівностей напиленого покриття  $H_{nap}$ . Нерівності покриття будуть, в свою чергу, тим менше, чим вище кваліфікація оператора установки. Величина допуску  $b_T$  буде також залежати від кваліфікації токаря, який спеціалізується на обробці напилених деталей. Величина допуску  $b_T$  практично може знаходитись в межах 0,5 – 1,0 мм.

Допуск на шліфування до необхідного розміру після проточування  $b_T$  залежить від якості абразивних кругів і точності станку. Ця величина приймається в межах 0,15 – 0,20 мм.

## Товщина відновлюваного покриття і допуск на її обробку

Найменування даних	Позначення за методикою	При товщині контакту, мм						
		до 1,5	1,5-2,5	2,5-3,5	3,5-4,5	4,5-5,5	5,5-6,5	6,5 і більше
Мінімально допустима товщина шару після кінцевої обробки, мм	$H_{\min}$	0,60	0,60–0,65	0,65–0,70	0,70–0,80	0,85–0,90	0,95–1,00	1,10–1,20
Допуск на токарну обробку (орієнтовні дані), мм	$b_T$	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	1,00
Загальний допуск на токарну обробку і наступне шліфування, мм	$b_{(T+ш)}$	0,65–0,70	0,75–0,80	0,85–0,90	0,95–1,00	1,05–1,10	1,10–1,15	1,15–1,20
Мінімальна товщина покриття для наступної обробки і шліфування, мм	$h_{(T+ш)}$	1,25–1,30	1,35–1,45	1,50–1,60	1,70–1,80	1,90–2,00	2,05–2,15	2,25–2,40
Допуск на шліфування без попереднього обточування, мм	$b_{(ш-T)}$	0,35–0,40	0,40–0,45	0,45–0,50	0,50–0,60	0,60–0,70	0,70–0,80	0,80–0,90
Мінімальна товщина покриття для наступного шліфування без попереднього обточування, мм	$h_{(ш-T)}$	0,95–1,00	1,00–1,10	1,10–1,20	1,25–1,40	1,45–1,60	1,65–1,80	1,90–2,10

Таким чином, загальний допуск на токарну і шліфувальну обробки  $b_{T+ш}$  може бути підрахований як сума допусків  $b_T$  і  $b_{ш}$  (рис. 3.16 б):

$$b_{T+ш} = b_T + b_{ш}. \quad (3.13)$$

Звідси мінімальну товщину покриття для наступної токарної і шліфувальної обробки  $h_{(ш+T)}$  можна підрахувати за формулою:

$$h_{(ш+T)} = h_{\min} + b_{(ш+T)}. \quad (3.14)$$

В ряді випадків напилена деталь обробляється до розміру шліфуванням без попередньої токарної обробки (рис. 3.16, в). допуск на шліфування без попередньої токарної обробки  $b_{(ш-T)}$  буде більше, ніж допуск  $b_{ш}$  на величину висоти нерівностей  $H_{nan}$ :

$$h_{(Ш-Т)} = b_{Ш} + b_{нап}. \quad (3.15)$$

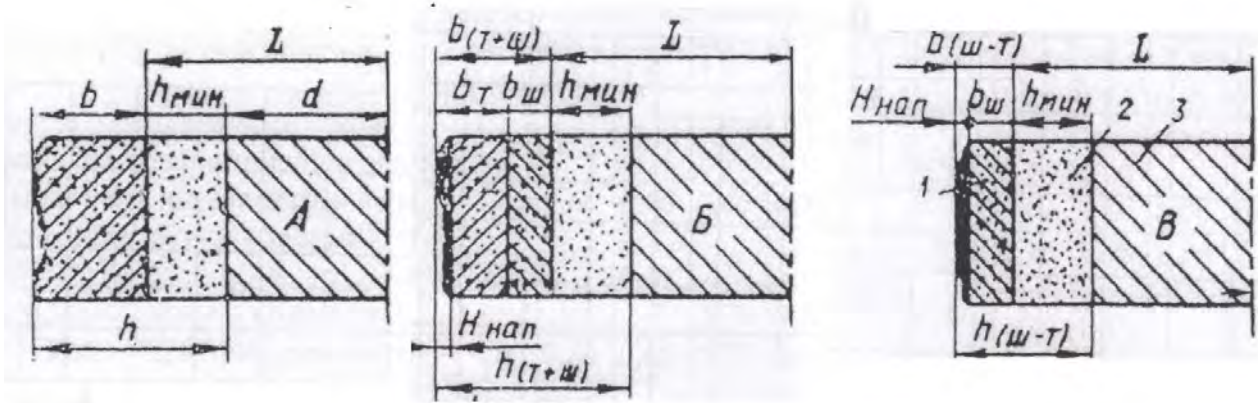


Рисунок 3.16 – Схеми до розрахунку товщини покриття контакту з урахуванням допусків на обробку:

1 – допуск на обробку; 2 – напилений шар покриття, який залишається після обробки; 3 – основний метал деталі

В цих випадках мінімальна товщина покриття  $h_{(Ш-Т)}$  підраховується за формулою:

$$h_{(Ш-Т)} = h_{\min} + b_{(Ш-Т)}. \quad (3.16)$$

Користуючись викладеною методикою, а також даними М.В. Катц і Є.М. Линник [48], були підраховані товщини напилених покриттів контактів допуски на їх обробку в залежності від діаметрів відновлюваних контакт-деталей. Вихідні дані і результати підрахунків зведені в табл. 2.4 шліфувальної обробки  $h_{(Т+Ш)}$ ; можна підрахувати за формулою:

$$h_{(Т+Ш)} = h_{\min} + b_{(Т+Ш)}. \quad (3.17)$$

Розглянемо формування товщини покриття у випадку попереднього нанесення прошарку, що характерно для процесу плазмового напилення з наступним рідиннофазовим спіканням. Однією з основних умов його успішного практичного нанесення є зберігання прошарку після операції напилення на нього порошкового покриття, що суттєво відрізняється від відомої технології газотермічного напилювання порошка на тонкий гетхоплавкий прошарок товщиною, яка не перевищує 10 – 15 мкм. При технології рідиннофазового спікання метал прошарку частково паровується і частково переходить до об'єму покриття.

В залежності від умов змочування часток порошка розплавом і пористості напиленого шару можливе утворення різноманітних варіантів композиційних



покриттів (рис. 3.17). При поганому змочуванні ( $\theta > 90^\circ$ ,  $\Theta$  – граничний кут змочування) на межі прошарок – покриття спостерігається розриви суцільності, які призводять до значного зменшення міцності покриття. Ефективно цей недолік можна усунути проведенням термообробки.


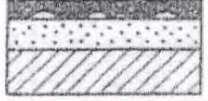
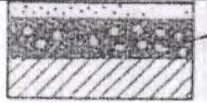


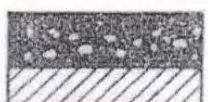
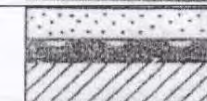

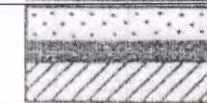
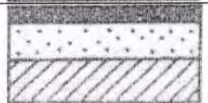
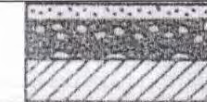


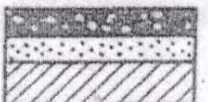
Умови процесу			Спінання в присутності легкоплавкого прошарку	
$\theta > 90^\circ$	---	$P=0$		
	$\Pi > 20\%$	$P > 0$		
				
	$\Pi < 20\%$			
$\theta < 90^\circ$	$\Pi < 20\%$	---		
	$\Pi > 20\%$	$P=0$		
		$P > 0$		

Рисунок 3.17 – Основні варіанти покриттів, що отримуються газоплазмовим напилюванням з наступним рідиннофазовим спінанням:

1 – основа; 2 – легкоплавкий шар; 3 – порошкове покриття; 4 – композиційне покриття

Максимального ефекту досягаємо при відкритому стані пористості. При в залежності від товщини прошарку і покриття, а також початкової пористості утворюються дві основні модифікації:

- 1) одношарове композиційне покриття;
- 2) двошарове покриття, яке складається з нижнього композиційного і верхнього пористого шарів.

Перша модифікація реалізується при виконанні співвідношення:

$$\delta \geq h(1 - \nu) = h_0 \Pi_0 + \Delta h, \quad (3.18)$$

де  $\delta$  – товщина легкоплавкого прошарку;  $h$  – кінцева товщина покриття;  $h_0$  – початкова товщина покриття;  $\Delta h$  – усадка покриття;  $\nu$  – об’ємний вміст основного матеріалу;  $\Pi_0$  – початкова пористість покриття. Для другої модифікації, яка відповідає виразу:

$$\delta < h(1 - \Pi) = h_0 \Pi_0 + \Delta h, \quad (3.19)$$

товщини нижнього і верхнього шарів відповідно дорівнюють:

$$\delta < h(1 - \Pi) = h_0 \Pi_0 + \Delta h, \quad (3.20)$$

$$h_1 = \delta \cdot \left[ 1 - \frac{h_0}{h} (1 - \Pi_0) \right]^{-1}, \quad (3.21)$$

$$h_2 = h - h_1.$$

Міцне з’єднання покриття з основою забезпечується спільним механічним зчепленням легкоплавкого металу з порошковим каркасом в об’ємі композиційного шару.

### 3.6 Високочастотне індукційне напилення

Високочастотне індукційне напилення вперше почали застосовувати в Росії. Принципова схема для високочастотного індукційного напилення показана на рис. 3.18. Поміщений в індуктор стержень (напилюваний провід) нагрівається і розплавлюється вихровими струмами, які виникають під дією змінного магнітного поля, утвореного при проходженні високочастотного струму по котушці. Розплавлений метал розпилюється струменем стиснутого повітря і наноситься на оброблювану поверхню. Процес напилення проводиться в камері з інертною атмосферою.

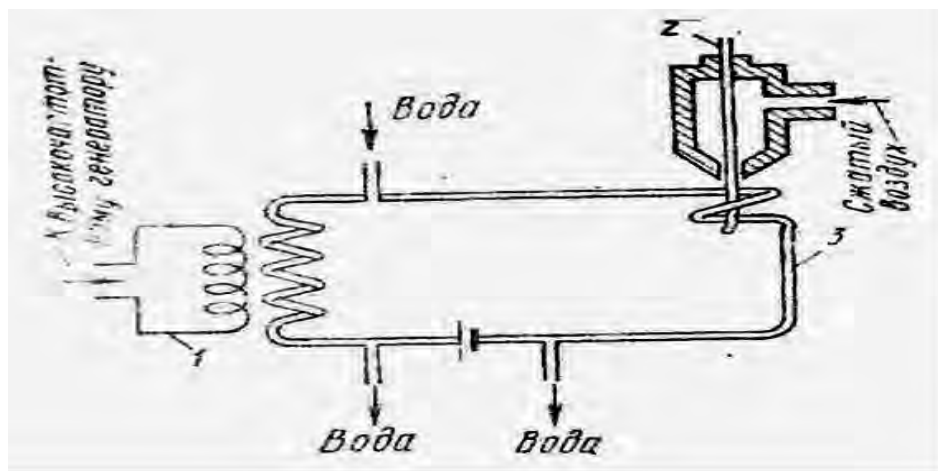


Рисунок 3.18 – Принципова схема пальника для високочастотного індукційного наплення.

На рис. 3.19 представлена конструкція пальника для високочастотного наплення. Напилюваний провід подається в пальник електричним приводом зі швидкістю 46 – 120 см/хв. Розмір напилюваних частинок, які утворюються при розплавленні проводу, залежить від тиску стисненого повітря і звичайно коливається в межах від 20 до 120 мкм.

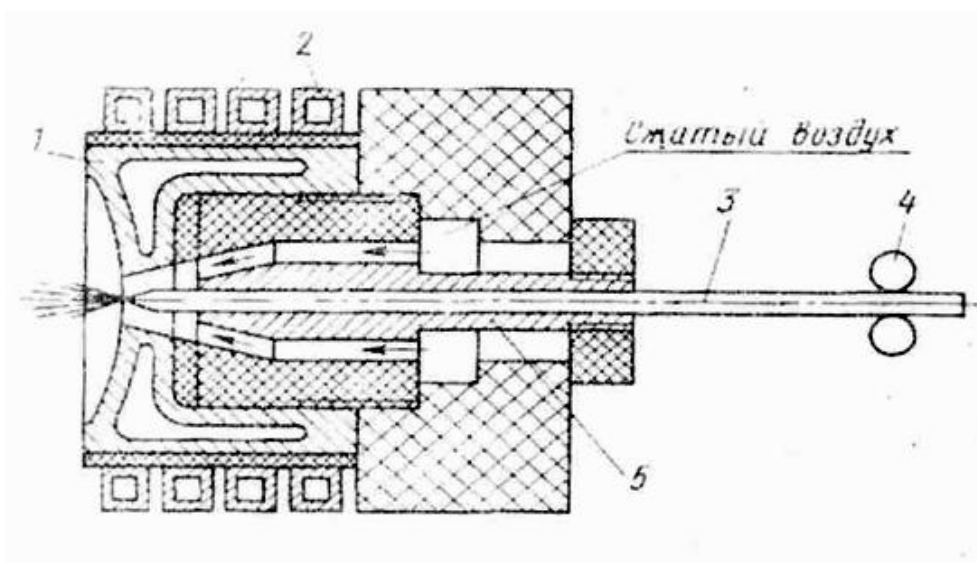


Рисунок 3.19 – Конструкція пальника для високочастотного індукційного наплення

При використанні інертних газів для наплення металів в покриттях утворюється невелика кількість окислів. Вигоряння елементів сплавів, напилюваних даним методом, незначне, а міцність покриття з основою висока. Але продуктивність при високочастотному індукційному напленні невисока.

### 3.7 Порівняльний аналіз методів напилення

Вище були розглянуті характерні особливості і принципи використовуваних в даний час різних методів напилення як газовогняних, так і електричних. Типовим методом напилення, який знайшов широке використання на практиці, є газовогняний метод напилення (провідниковий та порошковий). Крім того, широке розповсюдження починає отримувати напилення плазмовим струменем, який дозволяє наносити покриття із тугоплавких матеріалів, які задовольняють жорстким вимогам, необхідним при розробці сучасних машин.

В даному розділі розглянуто два основних методи напилення: газовогняний і плазмовий. Для газових факелів і плазмових струменів показано розподіл температур та швидкостей, а також їх газовий склад. Ці методи напилення співставні між собою при звичайних, використовуваних на практиці умовах роботи. Інші методи напилення тут не розглядаються оскільки, для нижченаведених характеристик, в літературі відсутні кількісні дані.

Розподіл температур в газових факелах і плазмових струменях. При напиленні матеріал, який подається в пальник, нагрівається і наноситься на поверхню основи в розплавленому стані або в стані, який наближується до розплавленого. Ступінь проплавлення і інтенсивність взаємодії напилюваного матеріалу з оточуючим середовищем в основному залежить від розподілу температури в струмені газу, який витікає із сопла газовогняного пальника або плазмового розпилювача.

При газовогняному напиленні як джерело теплоти використовують киснево-ацетиленові або киснево-пропанові факели. Максимальне значення температури, яка може бути досягнута в таких факелах, дорівнює температурі горіння компонентів. В табл. 3.5 наведені температури горіння різних газів.

Таблиця 3.5

**Температура при горінні деяких газів**

Горюча суміш	Температура горіння, °С	Горюча суміш	Температура горіння, °С
Кисень - ацетилен	3100	Повітря-ацетилен	2325
Кисень - бутан	3100	Повітря - водень	2055
Кисень - пропан Кисень - водень	2760 – 2700	Повітря-кам'яновугільний газ	1530

Для порошкового пальника типу Р фірми «Metco» (США) на відстані 60 – 70 мм від зрізу сопла температура на осі факела перевищує 2500 °С, а потім поступово знижується. На відстані 100 мм від зрізу сопла, на якому звичайно розташовується напилювана поверхня, температура складає 1900 °С, а на відстані 150 мм – 1400°С.

При напиленні провідниковим газовогняним пальником типу К фірми «Metco» із збільшенням відстані від сопла пальника температура різко падає. На відстані 50 мм вона складає 1500 °С, а на відстані 100 мм знижується до 500 °С. Це відбувається в результаті подачі в полум'я струменю стисненого повітря.

При напиленні порошку можна отримати покриття навіть у випадку неповного його проплавлення. Напилення проводу або прутка неможливе без повного розплавлення напилюваного матеріалу. Тому, в порівнянні з порошковим напиленням при провідниковому напиленні утворюються частинки, які на початковому етапі руху мають більш високу температуру і швидкість, що забезпечує і більш високу енергію вдарення частинок по поверхні і підвищує міцність зчеплення покриття з основою. Але при провідниковому або прутковому напиленні утворені розпилювані частинки швидко охолоджуються. При порошковому напиленні високотемпературна область полум'я в порівнянні з провідниковим має велику протяжність, що дозволяє ефективно використовувати дану область для нагріву летючих частинок.

Висока температура плазмового струменю дозволяє напилювати покриття із будь-яких, найбільш тугоплавких матеріалів, які в процесі нагрівання і плавлення в струмені плазми не випаровуються і не змінюють суттєво своїх властивостей.

В порівнянні з газовогняним напиленням плазмовий струмінь нагріває напилюваний порошок до більш високої температури і менше нагріває деталь, на яку наноситься напилення поверхні, що знижує величину термічних деформацій оброблюваного матеріалу.

При детонаційному напиленні швидкість ударної хвилі, утвореної при вибуху газової суміші кисень-ацетилен, складає 2950 м/с, а температура – 3000 °С, Під дією високої енергії вибуху частинки напилюваного порошку розганяються до швидкості 800 м/с. При ударянні частинки з оброблюваною поверхнею в результаті інтенсивних пластичних деформацій відбувається виділення теплоти і підвищуються температури частинок порошку до 4000 °С, що сприятливо діє на формування покриття.

При електродуговій металізації в атмосфері повітря температура дуги досягає декількох тисяч градусів. Під дією теплоти дуги відбувається розплавлення напилюваного проводу. Розплавлений провідник розпилюється струменем стиснутого повітря. Одразу після розпилення частинки виходять за межі високотемпературної зони електричної дуги і рухається в струмені газу, температура якого різко падає по мірі віддалення від дуги. Швидкість руху сталених частинок складає 100 – 180 м/с.

В процесі високочастотного індукційного напилення напилюваний матеріал розплавляється вихровими струмами і розпилюється струменем холодного стиснутого повітря. Тому, напилювані частинки по суті рухаються в газовому потоці, температура якого дорівнює температурі оточуючого середовища, що призводить до швидкого охолодження частинок. Характер розподілення швидкості в плазмовому струмені або факелі газовогняного пальника надає суттєвий вплив на швидкість руху напилюваних частинок. В плазмовому струмені і факелі звичайно визначають розподілення швидкостей у їх центральній частині.

При порошковому напиленні на відстанях 50, 100 і 150 мм швидкість газу відповідно складала 80, 50 і 30 м/с. При провідниковому напиленні на відстанях 50, 100 і 150 мм швидкість потоку дорівнювала 370, 160 і 95 м/с. Для порошкового напилення використовували пальник типу Р фірми «Metco», а для пруткового – пальник типу К. Вимірювання швидкості проводили по центральній вісі струменя. Згідно отриманих даних при силі струму 550 А на відстанях 50, 100 і 150 мм від зрізу сопла швидкість потоку складала відповідно 140, 55 і 35 м/с. Дослідження проводили на плазмовому розпилювачі SG-1 фірми «Plasmadyne». Згідно розрахунку при силі робочого струму 400 А, витратах робочого газу 43 л/хв і діаметрі сопла 5,5 мм швидкість струменя на виході із сопла складає 750 м/с.

**Газовий склад плазмових струменів і факелів газовогняних пальників.** При порошковому напиленні факел, утворений в процесі згогання газу і кисню, є джерелом енергії, необхідної для нагріву порошку. При провідниковому напиленні, а також у ряді випадків порошкового, для прискорення напилення частинок у факел вдувають струмінь стисненого повітря. Як наслідок, склад газу у факелі на різних ділянках буде змінюватись. При плазмовому напиленні після виходу робочого газу із сопла утворюється струмінь, який перемішується з оточуючою атмосферою. В результаті цього по мірі віддалення від сопла буде відбуватися зміна газового складу струменя. Дані про склад газу, в якому рухаються частинки напилюваного матеріалу,

мають більше значення для більш детального вивчення процесу взаємодії напилюваного матеріалу з високотемпературним потоком газу, механізму утворення і прогнозування властивостей покриттів, які отримують. Дані отримані на центральній осі полум'я. В дійсності ж напилювані частинки рухаються і в периферійних зонах факела, де газовий склад дещо відрізняється від складу в центральній частині сопла. Отримані дані дозволяють судити про загальний характер зміни складу газового полум'я.

При порошковому газовогняному напиленні вміст кисню в газовому полум'ї до відстані 100 мм від зрізу сопла є незначним. На ділянці у газовому складі факела міститься значна кількість закису вуглецю, що дозволяє вважати середовище, в якому рухаються частинки, в основному відновлювальним. При прутковому напиленні в полум'я подається струмінь повітря, склад такого полум'я в основному аналогічний складу оточуючої атмосфери. На зрізі сопла плазмовий струмінь складається тільки з робочого газу. У всіх розглянутих випадках незалежно від величини робочого струму при витіканні плазмових струменів в атмосферу відбувається інтенсивна інжекція атмосферного повітря в струмінь. На відстані 50 мм від зрізу сопла кількість повітря в струмені складає 55 – 65 %, а на відстані 100 мм – приблизно 90 %. Враховуючи це, не слід вважати, що при плазмовому напиленні, коли в якості робочого газу використовують інертний газ, в напилюваному металічному покритті утворюється невелика кількість окислів. Такі твердження потребують перевірки.

При напилюванні плазмовим струменем (робочий струм 550 А, витрата робочого газу-аргону 30 л/хв) видно, що при виході плазмового струменю із сопла відбувається інтенсивна інжекція в струмінь оточуючої атмосфери. При електродуговому і високочастотному індукційному напиленні розгін напилюваних частинок відбувається струменем стисненого повітря. Тому можна припустити, що при таких методах напилення рух частинок відбувається в повітряному середовищі. При детонаційному напиленні напилювані частинки вилітають з сопла в повітряну атмосферу, тому можна вважати, що їх рух відбувається також в повітряній атмосфері.

## 4 ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЕЛЕКТРИЧНУ ЕРОЗІЮ КОНТАКТІВ

### 4.1 Вплив хімічного складу середовища

На ерозію контактів істотно впливає склад середовища [41]. Так кисень активізує руйнівні дії на метали за рахунок окислювальних процесів і захищає метал контактів за рахунок впливу плівки на умови проходження струму, зміни роботи виходу електрону з катоду, катодного падіння напруги тощо.

Хак Н.А. [46] встановив, що робота виходу електрону із срібла дорівнює 3,94 В, а срібла з сульфідною плівкою - 4,33 В.

Усов В.В., Займовський А. С. [22, 24] вважають, що оксидна плівка полегшує емісію електронів і дає інтенсивну дугу мідного – 3 – 4 %. З ростом кисню знос катоду підвищується і особливо для міді. При великому вмісті кисню знос катоду супроводжується відпаданням від поверхні товстих плівок оксидів міді.

В технічно чистому азоті (0,4 %  $O_2$ ) знос катоду із Cu і Ag суттєво збільшується по відношенню до зносу в повітрі (21 %  $O_2$ ). Це пояснюється збільшенням катодного падіння напруги і енергії, яка виділяється на катоді.

Знос аноду збільшується з збільшенням  $O_2$ . При великих струмах (1 – 10 А) ефект мінімуму зносу катода зникає. В азоті, очищеному від кисню, ерозія W і Mo значно вище, ніж в повітрі. При замиканні кола з ємністю, ерозія більшості металів в повітрі вища, ніж в очищеному азоті [22].

Буткевич Ю.В. і Цейров Ю.В. [16] досліджували знос міді в залежності від швидкості обертання дуги на постійному струмі при  $I = 50$  А [36] та складу середовища. Знос катоду дуже залежить від швидкості переміщення катодної плями, а знос аноду не залежить. В цих же умовах в азоті анод не зношується. Установлена велика залежність зносу від домішок кисню в азоті. У чистому азоті руйнування мідного катоду відбувається за рахунок випаровування металу, а в суміші - за рахунок випаровування оксидного шару.

Встановлено, що в середньому при  $I = 50$  А оптимальною сумішшю є  $N_2 + 1$  %  $O_2$ . Вміст кисню в азоті менше 1 % значно збільшує знос катоду. Для контактів Ag 50 % + Cu 50 % оптимальною сумішшю є суміш з вмістом  $O_2$  до 7 – 10 %.

Разумихін М.А. [39] встановив, що незначні домішки  $O_2$  в нейтральному середовищі різко підвищують ерозію в металах, які окислюються на повітрі.



Koseh R. досліджуючи роботу мідних контактів діаметром 1 – 10 мм при  $U = 800$  В та  $I = 600 – 1400$  А при тиску  $9,799 \cdot 10^4$  Па, установив, що на катоді і аноді є різні втрати в залежності від типу газу. Втрати Ag в  $N_2$  перевищують втрати в кисні. Пояснюється це тим, що дифузія Ag в  $N_2$  значно сильніша ніж в  $O_2$ , напруга дуги на 25% > більша ніж в  $O_2$ , щільність також вища.

Пархоменко І.В. [31] досліджувала знос контактів на мідно-вольфрамових композиціях в  $N_2$  та Ag в залежності від швидкості газового потоку при  $I = 20$  А і виявила, що із збільшенням швидкості знос збільшується. В Ag нема росту зносу з збільшенням швидкості потоку. У випадку катоду із сплаву Cu + 12 % Al в азоті (0,3 %  $O_2$ ) картина зворотня. Основною причиною росту зносу міді є зміна балансу кисню в області катоду.

Ерозія в  $H_2$  майже в усіх металів, які окислюються, більша хоча дуга в  $H_2$  виникає складніше. Це говорить про те, що ерозія визначається не тільки кількістю електрики в розрядах, а й у взаємодії металу з середовищем: абсорбцією газу, окислювальними та іншими реакціями, а також фізичною природою газу, зарядом, масою, рухомістю іонів, теплопровідністю, потенціалом іонізації і іншими властивостями [22].

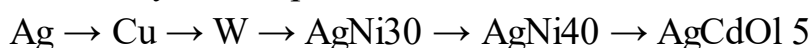
Ерозія Ag при  $I$  А,  $U = 30$  В в  $H_2$ , більша за ерозію міді в 20 раз [29].

Ерозійні випробування деяких матеріалів в Ag показали, що останній має низькі дугогасні властивості і в цьому відношенні значно уступає  $H_2$ .

Дослідження Turner H.W. і Turner G [35] показали, що в середовищі  $H_2$  ерозія вольфрамових контактів нижча, ніж в повітрі. Ерозія Ag в  $CO_2$  [22] в залежності від струму аналогічна ерозії в повітрі, в якому перенос з катоду при збільшенні струму переходить в зворотній перенос. Срібло в  $CO_2$  дає найменшу величину ерозії. В повітрі та у вуглекислоті ерозія катоду росте прямолінійно з струмом, але потім має перегиб і напрямом в область ерозії аноду. Ерозія анодів є характерною особливістю сильнострумівих контактів, які працюють на повітрі при постійному струмі. У контактів, які працюють в  $N_2$  з ерозією катоду, після введення повітря починається руйнування аноду. Спостерігається вплив на ерозію органічних речовин.

Narat і Manok [48] відмічають, що при включенні навантаження контактами покритими шаром графіту або сажі, коротка дуга з'являється звичайно при великих відстанях між контактами і подовжується час її гасіння. Відбувається підвищений знос.

Чаликов І.П. [39] розташовує контактні матеріали в такий ряд по ступеню зниження зносу в повітрі:



Усов В.В. і Займовський А.С. [22] пропонують такий ряд для N<sub>2</sub>, повітря, вуглекислоти та водню (табл. 1.4): Pd → Pt → Ag → Cu → Mo → W

Таблиця 4.1

**Знос контактних матеріалів в різних середовищах**

Матеріал	Середовище, (мг/цикл) - 10 <sup>-3</sup>					
	Повітря	N <sub>2</sub>	Азот очищений від O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Ag	H <sub>2</sub>
W	3,9	3,9	10	-	6,9	6,9
Mo	3,7	5,1	11		19	23,5
Cu		24,5	-	-	2,9	8,6
Ag	31,5	63	-	29	260	28,5
Pt	71	70	-	-	-	87
Pd	80	87	-	43	-	126

Встановлені кращі сполучення в таких комбінаціях газ-метал (по низькій величині і рівномірності ерозії та малому окисненню): в азоті W і Mo; в CO<sub>2</sub>-W і Ag в H<sub>2</sub>- W і Cu.

Атт СІ. [44] встановив, що при I=25 А об'єм обгорання у повітрі збільшується у такій послідовності Ag, Cu, незважаючи на те, що обгорання повинно було зменшитися із-за тугоплавкості. Це пояснюється інтенсивним утворенням окалини неблагородних металів Cu і Для Cu за його даними обгорання зменшується в такій послідовності: повітря, N<sub>2</sub>, He, SF<sub>6</sub>. Для W: повітря, N<sub>2</sub>, He, SF<sub>6</sub>-

Усов В.В., Лазоренко Б.Р., Заславська Л.В. [24] дають такі величини переносу анодів в повітрі і азоті після 5·10<sup>4</sup> замикань кола з U =110 В, I = 3 А при між електродному проміжку 1мм.

Таблиця 4.2

**Знос аноду після 50 тисяч замикань кола, мг**

Метал	Ca	Ag	Al	Cu	Ni	Co	W	Mo
Ваговий перенос в повітрі, мг	14,1	7,5	2,1	2,0	1,8	0,4	0,25	0,01
Ваговий перенос в азоті, мг	10,4	5,7	0,8	1,8	1,2	0,4	0,43	0,075

Посилене нагрівання дугою є визначним при обгоранні. На контактах з неблагородними металами при комутації струму в повітрі і електронегативних газах втрати металу збільшуються в результаті корозії.

Вільсон В.Р. отримав дані, які показують на малий вплив середовища на дуговий знос при великих короткочасних струмах.

Раховський В.І. [30] вважає, що тиск в приелектродній області парів катоду настільки великий, що наявність і відсутність зовнішнього середовища перестає бути суттєвим.

Ерозійні процеси на контактах можуть супроводжуватися зварюванням. Розрізняють зварювання:

- без плавлення металу;
- плавлення в районі контактних площадок;
- за рахунок електродинамічних сил при замиканні контактів;
- при виникненні дуги.

Наявність 10 та інших плівок значно зменшують міцність зварювання. Мерл В. [48] довів, що зварювання підвищується зі збільшенням питомого опору, твердості матеріалу та пониженням температури плавлення.

## 4.2 Вплив температури

Температура контактів змінюється в широких межах в залежності від величини струму, частоти комутації, тривалості включення, температури зовнішнього середовища.

В роботі [34] випробовувався контактор постійного струму на 10 А контактами при  $t = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При цьому  $I_{\text{вкл}} = I_{\text{викл}} = 20\text{ А}$ ;  $U_{\text{вкл}} = U_{\text{викл}} = 380\text{ В}$ , ПВ=63 %.

Частота комутації – 1300 в год. Температура контактів становила:

$t = -20\text{ }^{\circ}\text{C} - 52\text{ }^{\circ}\text{C}$

$t = +20\text{ }^{\circ}\text{C} - 91\text{ }^{\circ}\text{C}$

$t = +60\text{ }^{\circ}\text{C} - 157\text{ }^{\circ}\text{C}$

В табл. 4.3 наведені величини середнього питомого вагового зносу (г/цикл) при різних температурах зовнішнього середовища.

Автори [22] показують на те, що в омичному колі при зміні температури зовнішнього середовища від  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  відсутня явно виражена залежність ерозії від температури. При дослідженнях роботи контактів при різних температурах зовнішнього середовища можна обмежуватися розглядом

тільки допустимих Нигрівань сусідніх з контактами частин, ослаблених тисків між ними, зміною Механічних характеристик: опором розриву, твердості.

Таблиця 4.3

#### Ваговий знос при різних температурах навколишнього середовища

Температура зовнішнього середовища	Середній питомий ваговий знос (г/цикл) $10^{-6}$
-20°C	0,194
+20°C	0,173
+10°C	0,181

#### 4.3 Вплив відносної вологості

Буткевич Ю.В. і Цейров СМ. довели, що волога дещо знижує знос електродів мпаслідок більш стійкого горіння дуги.

Автори [58] довели, що з ростом відносної вологості ерозія контактів зростає.

Усов В.В. і Займовський А.С. приводять дані для від'ємного переносу на Аg контактах в залежності від параметрів зовнішнього середовища.

Таблиця 2.4 – Ваговий знос в залежності від параметрів зовнішнього середовища

Середовище			Перенос (мг/цикл)
склад	°C	вологість	
Нормальна атмосфера	20	45	0,003
Азот чистий, сухий	-	0	0,0015
Азот+1%O <sub>2</sub>	-	0	0,004
Повітря сухе	18-30	0	0,0004
Повітря вологе	18-30	95	0,0025
Кімнатне повітря	7	60	0.002
Повітря підігріте	120	0	0,001
Повітря сухе	-38	0	-

#### 4.4 Вплив атмосферного тиску

Дослідження Афанасєва І. В., Гущі А.І. [6] довели, що чим менший тиск зовнішнього середовища, тим менший імпульсний тиск на розплавленому металі і, отже, тим менше величина ерозії.

Кальман І.Г. [34] при дослідженні впливу тиску газу на питомий знос при  $I = 20\text{А}$  і постійній швидкості газу  $20\text{ м/с}$  при  $P = (9,799 - 39,196) \cdot 10^{-4}\text{ Па}$  довів, що при підвищенні тиску від  $9,799 \cdot 10^{-4}\text{ Па}$  до  $(19,59 - 24,49) \cdot 10^{-4}\text{ Па}$  питомий знос срібного катоду в повітрі, катодів з мідно-вольфрамової композиції в азоті і катоду з міді з  $6\%$  добавкою  $\text{Al}$  в азоті понижується, а при дальшому зростанні тиску він різко починає зростати. Автор пояснює це тим, що при підвищеному тиску затрудняється процес випаровування, а підвищення тиску і одночасно питомого витрату газу приводить до підвищення температури дуги, тому надходження енергії до електродів збільшується.

Буткевич Г. В. [15] досліджував зміну зносу в залежності від тиску при  $I = 15\text{ А}$  і швидкості переміщення дуги від  $15$  до  $30\text{ м/с}$  в технічному азоті (вміст  $\text{O}_2$  біля  $0,4\%$ ). Установлено, що характер зміни зносу для  $\text{Cu}$  і  $\text{Ag}$  катодів однаковий при зміні тиску від  $9,799 \cdot 10^{-4}\text{ Па}$  до  $44,09 \cdot 10^{-4}\text{ Па}$ . Існує різкий мінімум зносу в області тиску від  $24,49 \cdot 10^{-4}\text{ Па}$  до  $2939 \cdot 10^{-4}\text{ Па}$ .

При нерухомій дузі і газовому дутті з швидкістю  $20\text{ м/с}$  знос катоду також дає явно виражений мінімум. Мінімум зносу спостерігається внаслідок обставин:

1. Із зростанням тиску збільшується температура газу в зоні дугового стовпа, що пов'язано зі зменшенням шляху вільного пробігу електрону зі зростанням тиску газу, зростання ж  $t^\circ$  дугового стовпа ризводить до підвищення зносу контактів внаслідок підвищення теплової потужності, яка поглинається електродом.

2. З підвищенням тиску підвищується температура точки живлення металу, а це значить, утруднюється знос електродів. Можна уявити, що у вказаній залежності до мінімуму переважає другий фактор, а після мінімуму – перший. При дузі, яка рухається, знос катоду є вирішальним.

Із зменшенням тиску повітря число зіткнень атомів парів металу з молекулами газу зменшується і тому випаровування матеріалу контактів здійснюється більш інтенсивно [8, 10, 39]. Теплопровідність розрідженого повітря не залежить від тиску, гак як пропорційно зменшенню кількості перенесення тепла знижуються втрати тепла, яке переноситься кожною молекулою, внаслідок різких зіткнень з зустрічними молекулами. Відвід тепла

вільною конвекцією при зниженні тиску зменшується пропорційно кореню квадратному з густини повітря [39]. Погіршення його приводить до зниження границь пружності матеріалу пружин і зменшення контактного натиску.

Автори роботи [28] досліджували срібні і металокерамічні контакти КМК-А10 і КМК-А10М при  $P = 133,32 \cdot 10^{-5} - 101,323 \cdot 10^{-3}$  Па. Відстань між електродами дорівнювала 0,3 – 1мм. Електроди мали діаметр 6 мм і висоту 4 мм,  $I_{min} = 1,2$  А,  $I_{max} = 3$  А. Встановлено, що на Ag катоді розмір ерозійного сліду майже не залежить від тиску і різко локалізований.

На катодах КМК-А10 і КМК-А10М розрядом охоплена значна поверхня катоду, поверхня руйнується рівномірно і на малу глибину, знос зменшується.

У високому вакуумі відбувається зміна фізико-хімічних властивостей матеріалів. У вакуумі тиск дуже низький, але у катоді він перевищує атмосферний. Однак, внаслідок розширення струменю пару, тиск різко падає і дуга великого тиску біля катодного п'ятна переходить у дугу низького тиску в проміжку. Розпилення у ішвакуумних дугах відбувається в мостиковій і дуговій стадіях. Катод вакуумної дуги при струмі випускає електрони і струмені пару, а також викидає краплі розпиленого металу. У струменях пару відбувається іонізація. Бурне перетворення катодного п'ятна є однією із причин його неперервного руху. Якщо катод виготовлений із двох матеріалів, то катодне п'ятно зупиняється, чому відповідає низьке падіння напруги в дузі. Катод розпиляється інтенсивніше, ніж анод. У вакуумі його розпилення більше, ніж в повітрі при атмосферному тиску. Як в повітрі, так і у вакуумі знос збільшується при невеликих контактних проміжках [66].

Мелашенко І.П., Поволоцька М.Д. [48] проводили дослідження зносу контактів реле постійного струму в залежності від тиску  $101,323 \cdot 10^3$ ,  $666,6 \cdot 10^{-2}$  і  $666,6 \cdot 10^{-5}$  Па. Випробовувались контактні матеріали: - Ср 999, двокомпонентні композиції на основі Ag і 70W (СВ-70), з 10 % оксиду міді (СОЦ-8), з 3 % цинку (СОЦ-4), W і композиції на його основі (W з 20 % Re і W з 6,7% Ni – ВР-20 і ВН-6,7). Контакти комутували  $I = 60$  А при  $U = 30$  В та індуктивному навантаженні ( $t = 13$  мс) до 2500 циклів. Знос визначається по величині провалу. Випробовування показали, що при  $P = 666,6 \cdot 10^{-6}$  Па всі контакти значно зношувалися. При  $P = 666,6 \cdot 10^{-5}$  Па виявилось, що контакти із Ag і композицій на його основі найменш зносостійкі. Знос контактів із вольфраму і сплавів на його основі в 2 – 4 рази менші, ніж контактів із срібла і його композицій. Перенос металу в усіх випадках Направлений від катоду до аноду.

Вплив розрідженого повітря на процеси комутації при 30 В і 2 А активного навантаження зводився до ослаблення дугового розряду на контактах із сплав Pt + 10Ir і збереженням переносу з катоду на анод і посилення процесу горіння дуги на Ag контактах з інверсією переносу [10].

Нежданов В.Т. [48] вважає, що звичайні зміни атмосферного повітря мало впливають на знос. При низькому атмосферному тиску (133,32 Па) знос мідних контактів різко падає.

Філіпченко І.П., Рибін Г.Я. [25] довели, що понижений атмосферний тиск сприяє утворенню тліючих розрядів, які руйнують катод.

Досліди Раховського ВІ. [30] підтвердили те, що в довгогаснучих вакуумних дугах (10 – 20мс і більше) швидкість ерозії є експоненційною функцією струму в діапазоні струмів від 200 до 1000А.

При збільшенні струм до 5000А спостерігається відхилення від тієї залежності (повільніше зростання швидкості з збільшенням струму).

У випадках малих струмів анод збільшується в масі, очевидно, за рахунок конденсації пару матеріалу катод.

## 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ КОМУТАЦІЇ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГИ ТА ПОКАЗНИКИ ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ СТІЙКОСТІ КОНТАКТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МІДІ

### 5.1 Вольт-амперні характеристики електричної дуги та умови гасіння

При розмиканні контактів спочатку відбувається зменшення контактної поверхні, яка зменшується в часі по закону:

$$S_t = S_0 \left( 1 - \frac{t}{t_1} \right). \quad (5.1)$$

де  $S_0$  – величина контактної поверхні в замкнутому стані;  $t$  – час розходження контактів до моменту, коли сила тиску контактів дорівнює нулю.

При цьому приймається, що опір контактів в цей період обернено пропорційний контактній площі  $S_t$ . Це можливо до початку розходження контактів з утворенням зазору між контактними поверхнями, Як тільки контакти розходяться, опір їх збільшується, струм в колі споживача меншується, а падіння напруги безпосередньо на контактній парі збільшується. В цей час напруга на споживачі падає пропорційно струму.

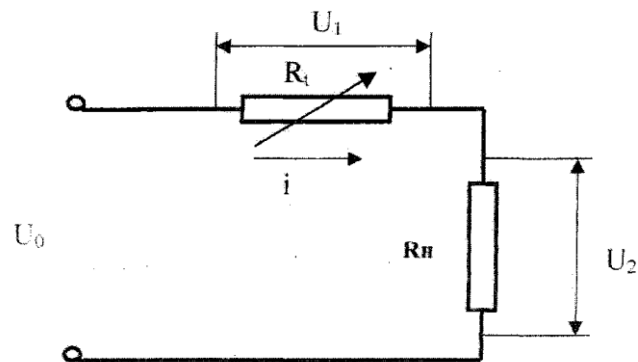


Рисунок 2.1 – Електрична схема дослідження перехідного опору контактів при комутації постійного струму.

Розмикаючі чи замикаючі контакти можна розглядати, як послідовно ввімкнений опір  $R_t$  з навантаженням  $R_n$ , який змінюється під час комутації від  $r = (R_0 - R_n)$ , що відповідає  $K_{\text{нр}}$  контактної пари в замкнутому стані до безкінечності, при повністю розімкнутому стані.



$$r = (R_0 - R_H), \quad (5.2)$$

де  $R_0$  – опір електричного колу при замкнутих контактах,  $R_H$  – опір елемента навантаження.

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0}, \quad (5.3)$$

де  $R_0$  – опір електричного колу при замкнутих контактах,  $U_0, I_0$  – напруга на всьому колі і струм в йому при замкнутому стані контактів,

$$0 < t < t_0. \quad (5.4)$$

де  $t_0$  – повний час розходження контактів,  $I$  – поточне значення часу розмикання контактів. Контактний опір є функція часу  $t$ . Процес розмикання контактів є збільшення опору від  $r = (R_0 - R_H)$  до  $R_t = \infty$ . При розмиканні контактів напруга росте від  $U_t = I_0 (R_0 - R_H)$  до  $U_0$  ( $i=0, R_t = \infty$ ).

Зміну опору в часі можна рахувати, що складається із трьох періодів.

Перший період – зменшення сили тиску приводить до зменшення контактних поверхонь. Опір збільшується, так як переріз по якому проходить струм зменшується, метал плавиться в контактних точках. Опір контактів в цей час не рівний безкінечності, хоча сила тиску може дорівнювати 0. Між опором стягування і чусиллям тиску  $P$  не існує прямої пропорціональності.

Другий період – коли провідність струму між контактними поверхнями чабезпечується рідким розплавленим металом при відсутності контактного тиску. При розмиканні каплі розплавленого металу розтягуються в мостики. Під дією електромагнітних сил окремі мостики можуть зливатися в один, так як вони зближуються, як провідники з струмом одного напрямку.

Розходження контактів може визвати їх механічне руйнування чи від випаровування його внаслідок високої температури. Відбувається розрив мостика і виникає дуга. Проходження струму забезпечується не металом, а іонізованим газовим проміжком.

Третій період – починається з появи дуги і продовжується до кінця розмикання контактів, коли дуга гасне, а струм в колі зникає. Дуга існує, коли Напруга мережі недостатня для забезпечення пробою, створеного проміжку між контактами. Опір розмикаючих контактів є опір трьох видів, що переходять послідовно один в другий:

1. опір стягування, що визначається контактними поверхнями, величина яких залежить від пружної деформації поверхні контактів.
2. опір розплавленого металу в вигляді “мостиків”.

### 3. опір іонізованого проміжку (вольтової дуги).

Струм і напруга між контактами при розмиканні кола з активним навантаженням змінюються прямолінійно в часі.

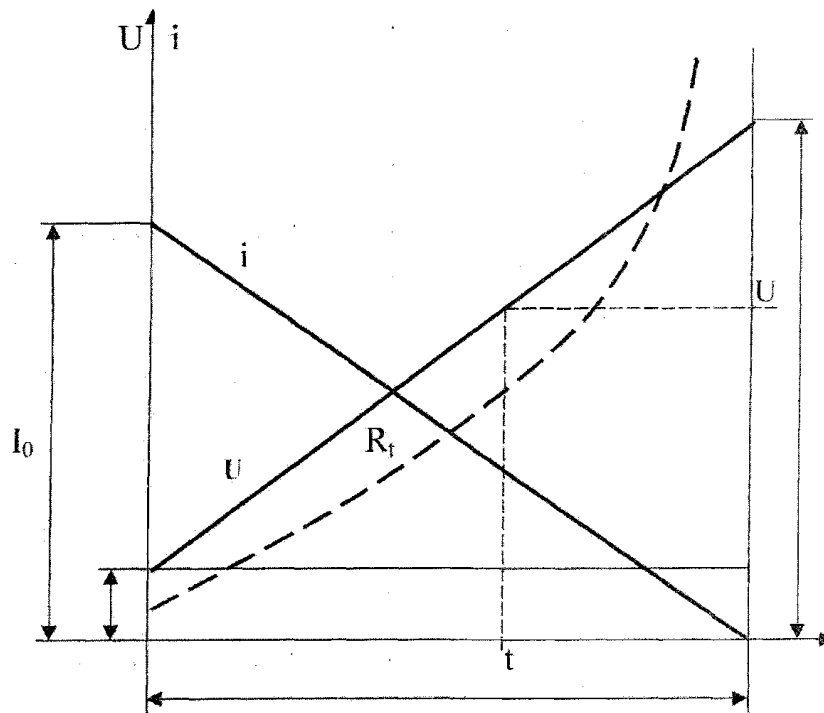


Рисунок 5.2 – Залежність напруги  $U$  та струму  $I$  на контактах при розмиканні.

### 5.3 Дослідження надійності контактування

Надійність контактних апаратів визначається в основному абсолютною величиною і стабільністю контактного опору. Проведені лабораторні дослідження показали, що при комутації струмів тривалого перевантаження перехідний опір контактів збільшується приблизно в 1,3 – 2,5 фаза, причому інтенсивність його збільшення залежить як від складу контактного матеріалу, так і від характеристик електричного кола: величини струму комутації, коефіцієнта потужності та ін. На електроерозійну стійкість випробовувалися контакти автоматичних вимикачів АЕ 2056 та ВА 51-29 при силі змінного струму 100 А, напрузі 380 В, з частотою вмикань-розмикань – 30 за 1 годину,  $\cos(\varphi) = 0,8$  а також на контакторах постійного струму типу КПЕ. Інтенсивність електричної ерозії електродів контактної пари автоматичного вимикача АЕ неоднакова. Різниця інтенсивності електроерозії рухомого і нерухомого контактів особливо проявляється в кінці ресурсу напруцювання.

Нерухомий контакт КМК-А41, який виготовлений з композиційного матеріалу (97 % срібла і 3 % графіту) має значно нижчу електроерозійну стійкість ніж рухомий КМК-А3Ом.

Низька електроерозійна стійкість контактів КМК А41 пояснюється крупнозернистою структурою матеріалу (100 – 150 мкм), великою різницею в значеннях густин срібла і графіту, поганим з'єднанням порошків цих матеріалів при виготовленні, що значно знижує фізико-механічні властивості контактів. Матеріал контакту КМК А3Ом – це система з певним розподілом її в твердому і рідкому стані. Фаза на основі нікелю в матеріалі срібло-нікель визначає його міцність і твердість.

Нікель у порівнянні з сріблом має більш високі температуру плавлення, твердість, теплоємність, але поступається йому по електро і теплопровідності.

Металографічні дослідження ерозійного руйнування електродів контактної пари КМК-А3Ом – КМК-А41 показали, що зміни в структурі робочих поверхонь контактів пов'язані із зміною їх функціональних характеристик. Вивчення зміни рельєфу поверхні і структури робочого шару контактів дозволяє виявити фактори і явища, які впливають на функціональні характеристики контактів.

На шести контакторах типу КПЕ-6 вимірювалось падіння напруги в 100 циклах комутацій після 20000 циклів спрацювань.

Падіння напруги в кожному циклі вимірювання було різним і випадковою величиною.

На основі дослідних даних визначалось середнє значення падіння напруги:

$$\Delta U_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^{100} \Delta U_i}{100}. \quad (5.5)$$

Визначення параметрів нормального розподілу покажемо для прикладу на контакторі №1 після  $20 \cdot 10^3$  комутацій.

З дослідних даних табл. 5.1 визначалось мінімальне і максимальне значення падіння напруги  $U_{\text{min}}$  і  $U_{\text{max}}$ .

Розмах падінь напруги в досліді складає

$$\Delta U_{\text{max}} - \Delta U_{\text{min}} = 960 - 640 = 320 \text{ мВ}. \quad (5.6)$$

Довжина інтервалу зміни випадкової величини становить:

$$h = \frac{320}{10} = 32 \text{ мВ}. \quad (5.7)$$

Таблиця 5.1

**Результати обробки дослідних даних якості контактування контакторів при комутації струму  $I_n=160$  А (напрацювання  $n = 20000$  циклів комутацій)**

№ контактора	Екстремальні значення падіння напруги		Середнє значення $\Delta U_{cp, mV}$	Розподіл відносно середнього		Розподілення дослідних даних по ділянкам									
	$\Delta U_{min}$	$\Delta U_{max}$		$U_i > U_{cp}$	$U_i < U_{cp}$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1	640	960	808,3	60	40	3	4	5	15	20	18	15	8	7	5
2	659	988,6	832,4	57	43	4	5	5	8	15	18	20	11	8	6
3	678,2	1017,3	856,6	55	45	5	3	4	16	19	24	15	7	4	3
4	621	931,7	784,3	49	51	3	8	21	20	20	10	4	5	5	4
5	607,5	911	767,3	46	54	3	7	8	26	15	21	8	6	4	2
6	634,4	951,5	801,2	52	48	4	6	9	25	16	20	9	7	3	3
<b>Сума</b>	3840,1	5730,1	4850,1												

Інтервал зміни випадкової величини розбився на 10 ділянок, початком першої ділянки явилось -  $U_{min}$ , а кінцем десятої ділянки -  $U_{max}$ .

Розмах падіннь напруги для контактора КПЕ-6 1 (табл. 5.1) становить:

I ділянка 640 ... 672 мВ;

II ділянка 672 ... 704 мВ;

III ділянка 704 ... 736 мВ.

Асиметрія і ексцес менші свого середнього квадратичного відхилення, тому виміри падіння напруги підкоряються нормальному закону розподілу.

Мінімально-можливі значення падіння напруги:

$$\Delta U_{min} = \Delta U - 3G_h = 808,3 - 3 \cdot 67,7 = 808,3 - 203,1 = 605,2 \text{ мВ.}$$

Максимально-можливі значення падіння напруги:

$$\Delta U_{MAX} = \Delta U + 3G_h = 808,3 + 3 \cdot 67,7 = 808,3 + 203,1 = 1011,4 \text{ мВ.}$$

Порівнюючи отримані значення  $U_{min}$  і  $U_{max}$  з даними дослідних спостережень, бачимо достатнє наближення

Результати розрахунків зводимо в табл. 5.2.

## Підрахунок моментів розподілу падіння напруги для контактора

№ п/п	Середина ділянки $A_i$	Відносна середина ділянки $У$	$УГ$	$У$	$Г$	Частота	$У,$	$УГ^2$	$УГ^3$	$Уі$
1	656	-5	25	-125	625	3	-15	75	-375	1875
2	688	-4	16	-64	256	4	-16	64	-256	102
3	720	-3	9	-27	81	5	-15	45	-135	405
4	752	-2	4	-8	16	15	-30	60	-120	240
5	784	-1	1	-1	1	20	-20	20	-20	20
6	816	0	0	0	0	18	0	0	0	0
7	848	1	1	1	1	15	15	15	15	15
8	880	2	4	8	16	8	16	32	64	128
9	912	3	9	27	81	7	21	63	189	567
10	944	4	16	64	256	5	20	80	320	1280
Сума						100	-24	454	-318	5554

Контактний опір електродів контактної пари КМК-А30м – КМК-А41 автоматичного вимикача АЕ 2056 зростає до 3000 циклів спрацювань від 0,17 ... 0,37 мОм до 0,2...0,44 мОм. Незначне підвищення контактного опору відбувається внаслідок утворення на поверхні контактів ізоляційних плівок, а також вихід на поверхню електроду КМК-А30м нікелю і його окислів, питомий опір якого складає  $8 \cdot 10^{10}$  мкОм. З збільшенням кількості циклів напрацювань контактний опір знижується і в подальшому стабілізується. Це пояснюється тим, що після припрацювання поверхні плівок і NiO дисоціюють і поверхня електроду очищується.

На поверхні нерухомого електроду КМК-А41 не утворюються тверді продукти окислу графіту і не погіршують тим самим електричну провідність поверхні електроду.

При нагріванні енергією дуги графітова складова електроду КМК-А41, яка має дуже високі температури плавлення (3700 °С) і кипіння (4830 °С), нагрівається до високих температур. При цьому проходить сублімація графіту, що виключає і утворення твердої фази окислів графіту на поверхні контакту. Це підтверджує В робоча поверхня контакту, де видно впадини, з яких сублімувався графіт.

IV ділянка 736 ... 768мВ;

V ділянка 768 ... 800 мВ;

VI ділянка 800 ... 832 мВ; III ділянка 832 ... 864 мВ; УШ ділянка 864 ... 896 мВ;

IX ділянка 896 ... 928 мВ;

X ділянка 928 ... 960 мВ.

“Помилковий нуль“  $C = 816$  мВ. Підрахуємо параметри нормального розподілу:

1) середнє геометричне значення

$$\Delta\bar{U} = \Delta(\Delta U) \frac{\sum n_i y_i}{\sum n_i} + C. \quad (5.8)$$

$$\Delta\bar{U} = 32 \left( -\frac{24}{100} \right) + 816 = -7,68 + 816 = 808,32 \text{ мВ.}$$

2) емпіричну дисперсію

$$S^2 = m_2 = [\Delta(\Delta U)]^2 \cdot \left[ \frac{\sum n_i y_i^2}{\sum n_i} - \left( \frac{\sum n_i y_i}{n_i} \right)^2 \right]. \quad (5.9)$$

$$S^2 = m_2 = 32^2 \cdot \left[ \frac{454}{100} - \left( \frac{24}{100} \right)^2 \right] = 4590.$$

3) стандарт відхилення

$$G_n = \sqrt{m_2}. \quad (5.10)$$

$$G_n = \sqrt{4590} = 67,7.$$

Виразуємо характеристики асиметрії та ексцесу для емпіричного розподілу падіння напруги заданого в табл. 5.3.

Визначимо емпіричний момент третього порядку

$$m_3 = h^3 \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i y_i^3 - 3 \sum_{i=1}^k \frac{n_i y_i^2}{n} \cdot \frac{n_i y_i}{n} + 2 \sum_{i=1}^k \left( \frac{n_i y_i}{n} \right)^3 \right]. \quad (5.11)$$

Знайдемо асиметрію

$$S_k = \frac{m_3}{G^3} = \frac{2043,1}{310743} = 0,0066.$$

Визначимо емпіричний момент четвертого порядку

**Результати розрахунків параметрів нормального розподілу мінімальних та максимальних падінь напруг при  $20 \cdot 10^3$  комутацій**

№ контактора	Середнє значення падіння напруги	Середнє квадратичне відхилення $G_i$	Асиметрія $S_n$	Ексцес $E_k$	Теоретично можливі значення напруг, мВ	
					$\Delta U_{\min} =$	$\Delta U_{\max} =$
1	808,3	67,7	0,006	2,7	605,2	1011.
2	832,4	71,8	0,0071	2,4	617	1047.
1	2	3	4	5	6	7
3	856,6	76	0,0064	2,14	628,6	1084.
4	784,5	63,8	0,008	3,04	593.2	975.8
5	767,3	61	0,00899	3,31	584,3	950.3
6	801,2	66,5	0,00791	2,79	601.7	1000.

З аналізу проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- різні контактні пари типу КМК А30м – КМК А41 мають низьку електроерозійну стійкість при комутації номінальних струмів і струмів короткого замикання;
- при наявності хімічно-активних елементів і сполук в навколишньому середовищі, що характерно для роботи в умовах тваринництва, перехідний опір контактної пари значно збільшується до недопустимих величин, що приводить до виходу з ладу автоматичного вимикача;
- срібло, як основна складова контактних матеріалів є дефіцитним і досить дорогим матеріалом, що утруднює випуск апаратів широкого асортименту і робить Практично неможливим їх ремонт.

### 5.3 Розрахунок величини дугової ерозії контактів

Рівень експлуатаційної надійності автоматичних вимикачів значною мірою визначається величиною дугової ерозії, кількісні показники якої зводяться до визначення тривалості горіння електричної дуги, її потужності, геометричних розмірів зони дії дуги та кількості розплавленого металу. Температурні поля контактів розраховуються з використанням циліндричної моделі [4]. При комутації струму потік енергії дуги викликає великий перепад

температур, що призводить до плавлення, випаровування та розбризування металу. Нелінійна задача теплопровідності металу} роз'яснюється з урахуванням плавлення і випаровування аналітичними наближеними методами з використанням чисельного інтегрування. У загальному випадку можна записати, що енергія  $W$  витрачається на нагрівання до температури плавлення  $Q_1$  та на плавлення матеріалу  $Q_2$ ,

$$W = Q_1 + Q_2. \quad (5.12)$$

Нестационарне температурне поле  $T(r, z, t)$ , в якому під дією теплового потоку  $P(r, t)$  дуги з опорним радіусом  $r_0$ , плавиться і випаровується починаючи з моменту часу  $t = t_0$ , описується рівнянням:

$$\frac{dT}{dt} = \alpha^2 \left( \frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dz^2} \right). \quad (5.13)$$

В розрахунках приймаються наступні початкові умови:

$$T_{t-t_0} = \frac{1}{2\alpha \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi}} \int_0^{t_{\text{п}}} \frac{d\tau}{(t_{\text{п}} - \tau)^{3/2}} \int_0^{t_{\text{п}}} P(r_1, \tau) \exp \frac{z^2 + r^2 + r_1^2}{4\alpha^2(t_{\text{п}} - \tau)} \cdot \frac{r + r_1}{2\alpha^2(t_{\text{п}} - \tau)}. \quad (5.14)$$

де  $T_n$  – температура плавлення,  $\alpha$ ,  $A$  – коефіцієнти тепло- і температуропровідності.

Електричні апарати, які експлуатуються в сільському господарстві, піддаються дії агресивних газів та пари, що призводить до інтенсивної корозії металевих частин, утворення біологічно активних речовин. Це в кінцевому результаті спричиняє уповільнення механічного руху контактної вузла та збільшення тривалості горіння дуги. Врахувати вказані явища можна шляхом введення додаткового джерела теплоти ( $P(t)$ ):

$$P(t) = [I(t)]^2 \cdot R(T). \quad (5.15)$$

де  $R(T)$  – функція опору контактної матеріалу.

У загальному випадку опір залежить від геометричних розмірів провідника, і у разі його циліндричної форми визначається за відомою формулою:



$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}. \quad (5.16)$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу, Ом мм /м;  $l$  – довжина провідника, м;  $S$  – площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup>. Оскільки визначені розміри об'єму розплавленого металу визначаються як  $z = \eta(r, t)$  та  $R_{пл}(t)$ , формула (5.16) набуває такого вигляду:

$$R(T, t) = \rho(T) \cdot \frac{4z(r, t)}{\pi [R_{пл}(t)]^2}. \quad (5.17)$$

При цьому потужність додатково введеного джерела визначається за наступним виразом:

$$R(t) = I^2(t) \cdot \rho(T) \cdot \frac{4z(r, t)}{\pi [R_{пл}(t)]^2}. \quad (5.18)$$

Теплота  $Q_2$ , яка витрачається на доведення розплавленого металу до температури кипіння і його випаровування становить:

$$Q_2 = W - Q_1 = m_1 g_1 + m_2 (T_K - T_1) c + m_3 g_3. \quad (5.19)$$

Тут  $m_1 g_1$  – теплота, яка витрачається на плавлення маси металу із прихованою теплотою плавлення;  $m_2 (T_K - T_1) c$  – теплота, яка витрачається на доведення маси металу до температури кипіння  $T_K$ ;  $m_3 \cdot g_3$  – теплота, яка витрачається на випаровування маси металу  $m_3$  з теплотою пароутворення  $g_3$ .

Поряд з масою металу, що випаровується  $m_3$  є маса, що була доведена до кипіння, але не випарувалася  $m_2 - m_3$ . Маса, яка залишилася тільки і розплавленою, складені  $m_1 - m_3$ .

Невідомі  $T(r, t)$  та  $\eta(r, t)$  визначаються з умов, які дають нелінійну систему інтегрально-диференціальних рівнянь. Наближений розв'язок цієї системи здійснюється таким чином. На першому етапі задача розв'язується з допущенням:  $Q(r, t) = 0$ . Рівняння руху поверхні  $z = (r, t)$  отримано для рівномірного, параболічного і нормального розподілу потоку теплоти  $P(r, t)$ . Якщо  $r / 2 \ll 1$ , то аналітичний вираз поверхні для рівномірного потоку має вигляд:

$$\eta(r,t) = \frac{0,48P_0^2}{T_{\Pi}L_{\Pi}\sqrt{\lambda}}(t-t_{\Pi})^{3/2} \cdot \left[ 1 - \frac{z^2}{4\alpha^2(t-t_{\Pi})} \exp \frac{z^2}{4\alpha^2t_{\Pi}} \right]. \quad (5.20)$$

де  $P_0$  – максимум теплового потоку (Вт/м<sup>2</sup>);  $c$  – питома об'ємна теплоємність контактного матеріалу (Дж/м<sup>3</sup>град).

Для розв'язання наведеної системи рівнянь розроблена програма в середовищі прикладних математичних програм MathСАБ для ПЕОМ типу ІВМ. Результати розрахунків представлені на рис. 2.3.

Рисунок 2.3 – Залежність електричної ерозії контактів автоматичних вимикачів від тривалості горіння дуги та величини струму комутації

## 6. ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПЕРЕХІДНИЙ ОПІР КОНТАКТІВ

### 6.1 Загальні відомості

На поверхні контактів, які стикаються з атмосферою утворюються завжди плівки, які мають деякий питомий опір. В роботі [29] приводиться таблиця з величинами питомих електричних опорів по даних деяких авторів.

Таблиця 3.1

**Величини питомих електричних опорів плівок**

Тип плівки	Питомий опір $\rho$ , Ом·см	Джерело інформації
Ag <sub>2</sub> S	$5 \cdot 10^6$	92
AgO	$5 \cdot 10^{12}$	92
Ag <sub>2</sub> O	$7 \cdot 10^{12}$	92
WO <sub>2</sub>	$10^{12}$	93,71,91
CuO	$10^{10}$	1,7,91,93
NiO	$10^8$	1,91,93
Графіт, вугілля	$(0,7 - 1)10^3$	8
Органіка	$10^9$	94
Сажа	$6,5 \cdot 10^4$	92

В. Мерл виражає опір плівки такою формулою

$$R_{\Pi} = \frac{\rho_{\Pi}}{F} d, \quad (6.1)$$

де  $R_{\Pi}$  – опір плівки, Ом;  $\rho_{\Pi}$  – питомий опір плівки. Ом·см;  $d$  – товщина плівки, см;  $F$  – поверхня дотику контактів, см<sup>2</sup>.

Прийнято замість добутку  $\rho_{\Pi} \cdot d$  брати електричну величину  $\sigma = \rho_{\Pi} \cdot d$  (Ом см<sup>2</sup>) – питомий поверхневий опір [32].

Який складається з перехідного опору  $R_{\text{пер}}$  та опору поверхневих плівок  $R_{\Pi}$

$$R_{\Pi} = \frac{\rho}{2\alpha} + \frac{\sigma}{\pi\alpha^2}. \quad (6.2)$$

де  $R_k$  – контактний опір, Ом;  $\rho$  – питомий опір контактного матеріалу, Ом·см;  $\sigma$  – питомий поверхневий опір плівки, Ом·см;  $\alpha$  – радіус поверхні дотику, см.

Ця формула використовується для тонких плівок.

Поверхневий опір ступеня  $10^8$  Ом·см практичного значення не має.

В. Мерл [48] прийшов до висновку, що провідність плівок товщиною  $d < 50 \text{ \AA}$  утворюється тунельним ефектом.

При товщині плівок  $d > 100 \text{ \AA}$  електропровідність залежить від їх стехіометричного значення. До таких плівок відносяться оксиди і сульфідні металів.

Ці плівки являються напівпровідниками і мають мінусовий температурний коефіцієнт питомого опору.

Опір контакту характеризується поверхневими плівками робочої поверхні контакту, структурою і складом матеріалу контакту, числом місць дотику і силою натиску [17].

Савченко В.С. побудував модель  $R_{nep}$  з урахуванням опору стягування ліній струму, нерівності поверхні та наявності плівок.

Копитін Ф.А. [40] розрахував опір контакту як омичний опір мікроступів.

Мелашенко І.П. та Розенталь Е.С. [47] вважають, що опір контактів в основному залежить від опору маси контактів і в незначній мірі від опору поверхні.

Плівки окислів і сульфідів металів змінюють розподіл ліній струму біля поверхні опору, впливаючи посередньо на перехідний опір контакту.

Намитковим К.К. розроблений загальний підхід до обчислення опору стягування на основі дисипації електромагнітної енергії.

В роботі приводиться розрахунок опору стягування з урахуванням наявності бс члічі випадково розподілених контактних площадок.

Перехідний опір в розімкнутих контактах поступово збільшується по лінійному закону (як правило) зі швидкістю, яка залежить від матеріалу, складу та температури середовища.

При кімнатній температурі на міді утворюється плівка товщиною  $d < 2,5$  нм, яка не є значною перешкодою до утворення контакту. Помітне окислення міді починається при  $t^\circ > 70$  °С [34, 22]. Мідні контакти при температурі 100 °С на протязі години збільшують контактний опір в 50 раз.

При замкнених контактах ріст опору значно нижчий. Так через 6 місяців опір мідних контактів збільшився в 100 раз.

За даними авторів [43] при нормальній температурі і контактному натиску 0,98 Н опір у мідних контактах через 6 місяців збільшиться в 200 разів, а у срібних тільки в 4 рази.

Протягом певного часу перехідний опір срібла і металокерамік, які містять срібло, практично не змінюються.

## 6.2 Вплив хімічного складу середовища

Перехідний опір контактів залежить від складу середовища його температури і часу знаходження в ньому контактів.

В роботі [12] проведено дослідження впливу сірчаних сполук на зміну перехідного опору контактів. Дослідження проводились протягом 15 діб при вологості 98% та перепаді температур  $\pm 60$  °C (три цикли).

Виявлено ріст перехідного опору в 7 ... 140 раз при малих натисках і струмах ( $P = 0,05$  Н;  $I = 0,02$  А) і при  $I = 0,5$  А тільки в 4 ... 9 раз.

При достатньо великих натисках плівка  $\text{Ag}_2\text{S}$  продавлюється із-за своєї м'якості і перехідний опір мало відрізняється від початкового.

Hentsch A. [46] установив збільшення перехідного опору срібних контактів у 20 ... 30 разів. Контакти знаходилися в повітрі з сірководнем 0,002 % протягом 20 діб. Температура повітря становила 20 °C, вологість 40 %). Перехідний опір вимірювався при струмі 0,5 мА і контактному натиску  $196,12 \cdot 10^6$  Н.

При наявності в повітрі 0,02 % сірководню і температурі 65 °C перехідний опір контактів збільшився в 40 ... 50 раз. Для полірованих контактів різниці у величині перехідного опору майже немає.

З точки зору стабільності перехідного опору Кузнецов Р.С.[43] розташував матеріали в такий ряд:

Ag, AgC, AgCaO, AgCdO, AgNi, Cd, Sn, W, Ni, AgMo, CuW, Cu, латунь, Al.

Дослідження Нача Т. і Мало К. підтвердили вплив  $\text{H}_2\text{S}$  на характеристики контактів із Ag і його сплавів з Au і Pd.

При наявності в сплаві золота більше 50 ... 60% і Pd більше 10 ... 20 % спостерігалось різке зменшення інтенсивності утворення плівок.

Залежність перехідного опору від товщини плівок при  $P = 0,1$  Н для міді: значно відрізняється при різних домішках ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ), а для срібла вони практично однакові.

В [35] наведено результати випробувань контактів із Ag, AgCdO (10 %), Al, Cu, W і Ni по циклу, який складався із 8 годин витримки при температурі 40 °C і Початкової концентрації по об'єму 0,6 %  $\text{SO}_2$  і 0,6 %  $\text{CO}_2$ , а також 16 годин При відкритій камері і нормальних кліматичних умовах. Додатково

контакти Тикож випробувались в гігостаті при 30°C, волога в якому становила 8 % фенолформальдегіда.

Перехідний опір змінювався при постійній напрузі 12 В , контактний натиск від 2 до 22 Н.

Найбільш стійкими в цих умовах виявились контакти із Ag і Ag + 10 % CdO.

У всіх інших контактних матеріалів відкази наступали приблизно після 5 циклів витримки їх у вказаних середовищах. Найбільше піддається їх впливу нікель. При наявності фенолформальдегіду найбільш стійкими є контакти Ag + 10 % CdO, а потім Al і Cu. і Ni покриваються плівкою, яка не проводить струм. Випробування показали, що напруга фриттинга знаходиться в межах 50 ... 450 В і не залежить від натиску в інтервалі 2 ... 22 Н.

Встановлено, що плівки після впливу фенолформальдегіду менш міцні, ніж в середовищі SO<sub>2</sub>.

При зміні натиску від 2 до 22 Н перехідний опір чистих контактів зменшується в 4 ... 8 раз, а після впливу агресивного середовища в 2,5 ... 18 разів.

Встановлено, що сульфідні плівки збільшують перехідний опір при індуктивних навантаженнях. Витенберг М.І. [20] вважає, що перехідний опір мало залежить від струму на срібних контактах покритих сульфідною плівкою.

При збільшенні струму перехідний опір зменшується обернено-пропорційно струму, що пояснюється зміною структури Ag<sub>2</sub>S.

Garte C.L., Соломон А. [26] проводили досліди сплавів, які мають нікель і встановили, що стабільність перехідного опору після впливу сірчистого амонію (NH<sub>4</sub>S<sub>2</sub>) значно вище у матеріалів, з вмістом нікелю від 10 ... 20 % до 60 %, ніж у матеріалів, які не мають нікелю.

Сульфідні плівки на сплавах з малим вмістом нікелю крихкі і мають малу адгезію.

Твердий нікель утворює тонку сульфідну плівку з високою адгезією. При впливі SC<sup>^</sup> твердий нікель має невеликий перехідний опір.

При комутації струму 0,1 А на Ag контактах при наявності парів органічних речовин утворюється наліт вуглецю, який приводить до збільшення перехідного опору.

Випробування показали [20], що опір при цьому не залежить від матеріалу, розмірів і форми контактів.

При комутації струму в Ag контакти з Ag і сплавів Ag + 30 % Cd при  $U = 6$  В і  $I = 1$  А після  $6 \cdot 10^6$  включень збільшення перехідного опору не

спостерігається, а в повітрі він є. Із збільшенням струму перехідний опір і зростає. Випробування в азоті проводились при  $I = 1$  А, 3 А. Азот має до 8 % різних домішок, в більшості це кисень. Тут яскраво виділяється тенденція до збільшення перехідного опору із збільшенням числа вмикань.

За даними Разумихина М.А. в азоті перехідний опір збільшується із-за утворення нітридів. При  $I = 2$  А і  $U = 30$  В при активному навантаженні і  $P_{\text{макс}} = 2,94$  Н перехідний опір для більшості матеріалів в  $\text{H}_2$  менший, ніж в Ag, а для Cu, Mo і W менший ніж у вакуумі. Останнє пов'язано з більш швидкою і повною дисоціацією окислів в  $\text{H}_2$  дякуючи сильній відновлювальній властивості водню.

Найменше перехідний опір в  $\text{H}_2$  має Cu і Ag, а найбільший W. Перехідний опір Ag у водні при  $P = 0,245$  Н значно більший, ніж у Cu в  $\text{H}_2$  і в 2,5 рази більший, ніж у Mo в  $\text{H}_2$ .

Встановлено, що при роботі контактів із Cu в  $\text{H}_2$  при  $P = 0,039$  Н відсутні фазові перетворення у контактах при  $I < 45$  А.

Порівняно більший перехідний опір при  $I = 0,1$  А пояснюється наявністю залишків окислів Cu, які при великому струмі дисоціювали.

### 6.3 Вплив температури

Хольм Р. встановив, що перехідний опір змінюється під впливом нагрівання по закону аналогічному зміні опору стягування:

$$R_{\text{пер}} = R_0 \left( 1 + \frac{2}{3} \alpha \cdot Q \right), \quad (6.3)$$

де  $R_0$  – опір при  $\theta = 0^\circ\text{C}$ ;  $Q$  – температура контакту;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору металу контакту.

Лядова Л.П., М'ясникова Н.Г. [45] пояснюють зменшення опору при зменшенні температури тим, що вплив збільшення контактної площадки перевищує вплив зменшення електропровідності.

Фитенченко І.П., Рибін Г.Я. вважають, що перехідний опір при збільшенні  $t$ , збільшується і стає нестабільним із-за зменшення контактного натиску і більш активного проходження окислювальних процесів.

При від'ємній  $t$ , на поверхні може конденсуватися волога і продукти випаровування ізоляційних матеріалів, що приводить до підвищення перехідного опору.

Аналогічну залежність приводять і інші автори [43].

Копитін Ф.А. [40] вивів формулу для перехідного опору гарячих контактів такого вигляду:

$$R_{пер} = \frac{\left(1 + \frac{2}{3}\alpha \cdot Q\right) \cdot Q}{P_k^{0,5}}. \quad (6.4)$$

Він встановив, що при збільшенні температури середовища середнє значення перехідного опору (як правило) знижується.

Ця залежність не погоджується з відомою, що можна пояснити збільшенням контактних площадок і дисоціацією плівок з підвищенням температури і переважанням цих факторів над факторами, які підвищують перехідний опір.

Оточі Т. вивів таку залежність:

$$R_{пер} = R_0 E^{-\alpha \cdot Q}$$

Автор вважає, що сульфідні і оксидні плівки мають напівпровідниковий характер, тому перехідний опір має тенденцію до іпшення при підвищенні температури.

Відносне зниження перехідного опору мідних контактів більше, ніж у срібних, так як плівка у них більш тонка.

Брон О.Б. [11] також вказує на зменшення перехідного опору срібних контактів при збільшенні температури, причому на його думку тут існує лінійна залежність. Він вважає, що зменшення перехідного опору пов'язано із збільшенням розмірів контактних площадок в результаті пластичної деформації. Окисли міді дисоціюють при температурі вище, ніж температура контактів, тому їх перехідний опір зростає.

Опір металокерамічних контактів КМК-А10, КМК-А31 з підвищенням температури при неперервному проходженні струму знижується [18, 40]. Це пов'язано не тільки з руйнуванням оксидів срібла, а із збільшенням розмірів контактних площадок в результаті пластичної деформації металу.

Декабрун Л.Е. [30] встановила, що з підвищенням температури і струму при металевій провідності перехідний опір зростає. Якщо плівки напівпровідникові, то спостерігається тенденція до зниження перехідного опору при підвищенні температури, чим товща плівка, тим більше зменшується перехідний опір.



## 6.4 Вплив відносної вологості

Існує думка, що перехідний опір при підвищенні відносної вологості збільшується і стає нестабільним.

Автори [12] встановили, що перехідний опір при підвищенні вологості змінюється мало, за виключенням контактів, які працюють при малих зусиллях (при  $P = 1,96 \cdot 10^{-3} \dots 49 \cdot 10^{-3}$  Н перехідний опір збільшується в 2 ... 14раз, а при 0,245 ... 1,96 Н в 1,1 ... 1,5 рази).

Дослідженнями Копитіна Ф.А. [40] встановлено, що із збільшенням вологості до 98 % величина перехідного опору срібних контактів з підвищенням  $t^\circ$  змінюється значніше ніж при  $\varphi = 65\%$  [39].

Волосевич Г.Н. [22] проводив дослідження схильності різних матеріалів до утворення струмопровідних містків при наявності вологи. Такі містки закорочують зазор і приводять до фальшивих спрацювань схеми.

Під дією напруги крапля, дистильованої води, внесена в зазор, насичувалась оксидом металу і її електричний опір зменшувався.

Утворювався струмопровідний мостик.

Ag, Re, Cu, Ag + 20 % Cd схильні до утворення мостиків. Матеріали, які перешкоджають утворенню мостиків, ведуть себе в такому порядку:

Ni, Au, Pd + 10 % Ir, Ag + 40 % Pd, Pd + 18 % Pt.

## 6.5 Вплив атмосферного тиску

Бельська А.Е. [10] встановила, що перехідний опір в умовах пониженого атмосферного тиску не має яскраво вираженої залежності від числа комутацій. Характер впливу тиску на перехідний опір залежить від I матеріалу контакту.

Копитиним Ф.А. [41] встановлено, що при комутації струму при підвищеній температурі і при пониженому атмосферному тиску, зона розкиду перехідного опору звужується, а середнє значення зменшується в порівнянні з нормальними умовами.

Пониження перехідного опору тим помітніше, чим вище  $t^\circ$ . З зниженням тиску зменшується мікрогеометрія контактів за рахунок більш інтенсивного випаровування металу, збільшується об'ємне і поверхневе газовиділення, утворюються плівки, що приводить до збільшення перехідного опору. При цьому зменшується інтенсивність окислювання процесів і збільшується пластична деформація контактів, останні фактори переважають над першими.

Залежність  $R_{пер}$  від тиску при  $t^\circ = +20^\circ\text{C}$ ,  $+75^\circ\text{C}$  близька до лінійної.

Із проведеного аналізу вітчизняної і зарубіжної літератури випливає, що вивченню питання утворення поверхневих плівок на контактах без струму (як в замкненому, так і в розімкненому стані), а також при комутації контактами струму присвячено багато досліджень.

Рядом дослідників вивчене питання про умови утворення різноманітних видів плівок (плівки потускнення, пасивуючі, адгезійні) на контактних матеріалах. Але разом з тим питання існування того чи іншого виду плівки в конкретних умовах потребує подальшого дослідження.

Так, наприклад, існує думка про різні способи утворення оксидних і полімерних плівок (окислення за рахунок хімічної реакції ерозированого в пароподібному стані металу з киснем середовища, чи за рахунок реакції кисню безпосередньо з поверхнею контакту, чи за рахунок взаємодії кисню з поверхнею розплавлених окремих крупніших чи дрібніших частинок, які викидаються з поверхні металів, полімеризація чи крекірування органічних парів, коксування їх чи хімічна реакція матеріалу з парами).

Деякі дослідники вважають можливим утворення адгезійних плівок із декількох шарів при певних умовах.

Склад і питомий електричний опір для плівок на чистих металах, а особливо на металокераміці мало вивчені.

Багатьма дослідниками показано, що плівки можуть утворюватися не тільки при наявності окислювальних або агресивних агентів, а і в нейтральних середовищах і в вакуумі при наявності парів органічних речовин. В нейтральних газах утворюються адсорбовані плівки, а в вакуумі плівки складаються з аморфного вуглецю, який утворюється за рахунок попадання парів масел із насоса. Встановлено, що температура може двояким чином впливати на процес утворення плівок. Тому, процеси на контактах потрібно пояснювати по-різному.

Вологість при наявності забруднень сильно впливає на утворення плівок. При високій вологості на поверхні контактів можуть утворюватися адсорбовані шари вологи-плівки. Підвищення вологості при наявності пилу зменшує число пошкоджень. Понижений тиск затрудує процес утворення плівок, а підвищений прискорює його.

Багато авторів вказують на можливість провідності плівок завдяки тунельному ефекту (тонкі плівки).

Встановлено, що зміна температури мало впливає на напруженість фриттінга. Одні дослідники доводять, що вологість не впливає на напруженість, а інші – з підвищенням вологості збільшується вірогідність пробою.

Якщо сам механізм пробою плівок частково вивчений, то вплив різних по механічному складу середовищ на це явище майже не вивчений.

Установлено, що процес утворення плівок безпосередньо впливає на величину перехідного опору, опір змінюється за рахунок структури плівок, інші – за рахунок зміни при наявності плівок кількості контактних п'ятен. Існує думка про спільний вплив вказаних факторів. Поряд з впливом фізичних процесів в плівках на перехідний опір здійснює вплив матеріал контактів і величина контактного натиску.

Встановлено вплив навантаження на перехідний опір. Омичне менше впливає на перехідний опір, ніж індуктивне. Деякі автори вказують на зростання перехідного опору з числом циклів, інші на зниження його. Найбільш широко вивчено вплив контактного натиску на перехідний опір.

Одними дослідниками встановлена випадкова залежність перехідного опору від струму у вигляді випадковості стану контактної поверхні. Інші доводять, що перехідний опір визначеної залежності не має.

Вважають, що перехідний опір до певного значення струму не змінюється, а потім стрибкоподібно зменшується. Є думка, що перехідний опір не залежить від струму тільки при великому контактному натиску.

Хімічний склад середовища впливає на величину  $K_{пер}$ , так як при цьому встановлена наявність фізико-хімічних процесів на контактах. Але міра цього впливу залежить від середовища.

В питанні розгляду впливу температури на величину  $K_{пер}$ , існують різні думки. Одні вважають, що із збільшенням температури –  $K_{пер}$  зростає. Це пояснюється зростанням питомого опору, зменшенням контактного натиску і більш активним протіканням окислювальних процесів. Інші автори вважають, що  $K_{пер}$  з ростом температури зменшується завдяки тому, що збільшення контактної площадки переважає над впливом зменшення теплопровідності, а також тим, що сульфідні і оксидні плівки мають напівпровідниковий характер.

Існує думка про наявність лінійної залежності між  $K_{пер}$  і температурою і про різну інтенсивність зміни  $K_{пер}$  на початку і при подальшій обробці.

Питання про вплив температури на величину  $K_{пер}$ , як видно, до кінця не вияснене. Потребує уточнення і питання про вплив вологості на  $K_{пер}$ . Одні дослідники вважають, що з підвищенням відносної вологості  $K_{пер}$  зростає, інші – вплив відносної вологості незначний, за винятком роботи контактів при малих зусиллях. Встановлено можливість утворення струмопровідних Мостиків при наявності вологості.

Атмосферний тиск впливає на  $K_{пер}$ , бо він впливає на утворення поверхневих плівок. Великий інтерес представляють дослідження видів залежностей від вказаних факторів. Потрібно відмітити, що вплив середовища, матеріалу, струму і напрацювання на величину  $K_{пер}$  розглядалося окремо. Не встановлена яка-небудь кореляція між вказаними параметрами. А разом з тим вивчення кореляційних зв'язків є дуже важливим питанням.

Недостатньо вивчені структурно-фазові і фізико-хімічні зміни на поверхні контактів і зворотній вплив цих змін на процес їх руйнування.

Вплив хімічного складу середовища найбільш повно вивчено для кисню та технічного азоту, ще мало експериментального матеріалу, згідно якому можна було б зробити теоретичні висновки.

Вплив температури зовнішнього середовища зводиться до виявлення температурного перегріву контактів. Вважають, що зміна температури на 100 °С не приводить до явно вираженої залежності ерозії від температури.

Є роботи, які підтверджують наявність впливу вологості, а також тиску (якщо останній змінюється на декілька порядків) на ерозію контактів. Однак, кількісних залежностей величини ерозії від вказаних факторів не існує.

Деякі автори заперечують зовсім вплив зовнішнього середовища на ерозію, так як тиск парів в при електродних областях настільки великий, що - наявність чи відсутність середовища перестає бути суттєвим. В літературі не зустрічаються дані про комплексний вплив вказаних факторів на величину ерозії та про кореляцію між ними. Найбільш повному вивченню представлені процеси при розмиканні контактів, але процеси при їх замиканні здійснюють значний вплив на їх працездатність. Проведений аналіз стану теоретичних і практичних розробок впливу зовнішнього середовища на роботу контактів електричних апаратів дозволяє зробити висновок про необхідність постановки спеціальних досліджень з метою одержання кількісних закономірностей, які відображають характер дії середовища на роботу контактів, пояснення фізичного механізму і особливостей процесів на контактах.

## **6.6 Дослідження залежності перехідного опору від концентрації агресивних газів виробничої атмосфери**

Мікроклімат тваринницьких приміщень характеризується високою відносною вологістю, наявністю хімічно-активних тазів і парів та біологічно активним-середовищем.

Для визначення кількісних показників рівня загазованості в тваринницьких приміщеннях проводилися хімічні аналізи виробничої атмосфери з допомогою універсального газоаналізатора УГ-2.

Дослідження показали, що концентрація агресивних газів і парів коливається в широких межах і залежить в загальному випадку від температури оточуючого середовища, пори року, часу доби, виду і щільності розміщення тварин.

Дослідження атмосфери тваринницьких приміщень ряду господарств України показали, що параметри промислової атмосфери коливаються в таких межах:

– температура	+3 ...+25 °С,
– відносна вологість	65... 100 %,
– вміст аміаку	1 ... 50 мг/м,
– вміст сірководню	1 ... 30 мг/м <sup>3</sup> ,
– вміст вуглекислого газу	1 ... 20 %.

В нічний час концентрація агресивних газів збільшується. Збільшення загазованості відмічається також і під час прибирання тваринницьких приміщень. Максимальне значення концентрації агресивних газів спостерігається в осінньо-зимовий період. Такі коливання дослідних параметрів пояснюються недосконалістю вентиляційного обладнання, так як всі вентиляційні установки, які в даний час серійно випускаються, регулювання мікроклімату проводять не по комплексу параметрів виробничої атмосфери, а тільки по одному параметру – температурі.

Електричні апарати, які випускаються промисловістю і широко використовуються в складі технологічного обладнання сільськогосподарських підприємств, в більшості випадків не відповідають вимогам по захисту від оточуючого середовища. Так в відповідності з технічною документацією на автоматичні вимикачі типу АЕ2000, ВА51 [27,28] вони повинні експлуатуватися при температурі оточуючого середовища від -60 до +60 °С в виробничій атмосфері, яка не містить агресивних газів, рідин та пилю. Використовування захисних корпусів комутаційних апаратів з рівнем захисту IP 54, IP 55 тільки частково захищає від впливу вологи і короткочасного збільшення концентрації газів. При довгочасному впливі агресивних газів проходить вирівнювання концентрації газового середовища між оточуючим середовищем та повітрям всередині корпусу. Цей процес прискорюється при повторно-короткочасному режимі роботи комутаційного апарату за рахунок його нагрівання. При охолодженні на поверхні металічних частин корпусів

конденсується волога з розчиненими в ній агресивними газами, що в кінцевому результаті приводить до різкого збільшення атмосферної корозії.

Для визначення міри впливу хімічно-активних елементів на контактний опір проводилися спеціальні дослідження, в кліматичній камері з герметичною приставкою, яка дозволяє підтримувати концентрацію агресивних газів сірководню ( $H_2S$ ), аміаку ( $NH_3$ ) в межах 1 ... 100 мг/м<sup>3</sup>, при відносній вологості до 95 % і температурі -40 ... +40 °С.

Досліджувались як дослідні контакти на основі міді, так і срібно-мідні контакти. Паралельно проводилися дослідження контактних матеріалів в виробничій атмосфері в умовах тваринницьких ферм. Оцінка інтенсивності росту сторонніх включень здійснювалась шляхом вимірювання контактної опору.

Дослідження роботи контактів в нормальній атмосфері при комутації струму 50 А напругою 380 В показало значне збільшення контактної опору за 1500 циклів напрацювань при подальшому його зменшенні. Найбільш (імовірніше це пояснюється тим, що на поверхні контактування відбуваються процеси припрацювання і окислення. При подальшому збільшенні кількості циклів структура робочого шару змінюється, контакти нагріваються до більш високої температури, хімічно-активні плівки дисоціюють, що приводить до часткового очищення робочої поверхні.

В середовищі з наявністю компонентів аміаку, сірководню контактний опір «іпчно зростає порівняно з чистим повітрям, оскільки на робочих поверхнях крім активних елементів з'являються плівки на основі сірки, азоту тощо.

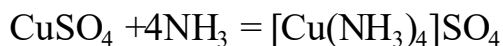
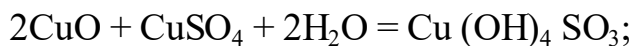
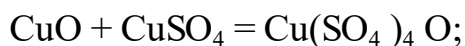
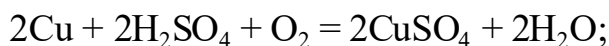
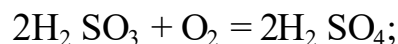
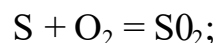
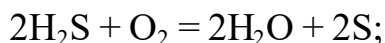
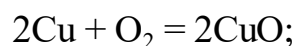
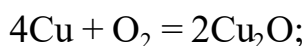
Після 2000 циклів напрацювань контактний опір зменшується.

Суттєву роль відіграють структурні перетворення в контакті, де на поверхні створюються тверді карбіди молібдену. Останні при замиканні подавляють і руйнують оксидну плівку на дрібні частинки, які відслонюються від основного матеріалу і очищають поверхню.

Оскільки летючі елементи Ni, домішки графіту і триоксиду молібдену складають невеликий процент по відношенню до міді і молібдену, тому взаємодія міді і молібдену з навколишнім середовищем служить фактором, який визначає значення контактної опору в автоматичних вимикачах.

Оксидні плівки міді, як відомо, утворюються і при кімнатній температурі і товщина її досягає не більше 5 мкм. Така плівка захищає мідь від подальшого окислення киснем.

Механізм утворення ізоляційних плівок в атмосфері сірководню, аміаку при підвищеній вологості визначається наступними хімічними реакціями:



Питомий опір  $\text{Cu}_2\text{O}$  10 мкОмм, але він не впливає на контактний опір електродів, так як плівка дуже тонка, то електрони її проходять завдяки тунельному ефекту. Швидкість окислення змінюється по логарифмічному закону. Молібден починає окислюватися при 400 °С. При 600 °С утворюється вищий окисел  $\text{MoO}_3$ . Пари води при 700 °С окислюють його до двоокису в молібдену. При температурі вище 650 °С  $\text{MoO}_3$  сублимує і в газовій фазі при температурі 900 – 1000 °С полімеризується в  $(\text{MoO}_3)_n$  забираючи енергію з дуги. Дія сірководню на молібден при температурі 800 °С утворює на його поверхні дисульфід молібдену  $\text{MoS}_2$ , який збільшує контактний опір.

Утворення продуктів корозії  $\text{CuS}$  чи  $\text{Cu}_2\text{S}$ , при дії сірководню відбувається при температурах між 90 і 250 °С на обох поверхнях розділу створеного сульфідного пористого шару. При температурі вище 600 °С швидкість росту плівки збільшується і утворюється лише сульфід міді.

Вивчаючи можливості застосування спечених контактних матеріалів на основі міді в агресивній виробничій атмосфері поряд з ростом оксидних шарів, визначальним є перш за все питання яким чином руйнуються названі шари при механічному вмиканні і при навантаженні тривалими струмами.

Проведені дослідження сульфідними плівками товщиною до 600 нм. дозволяють вяснити, що величина руйнування оксидних шарів визначається в значній мірі товщиною та складом плівки, а також швидкістю вмикання.

Руйнування поверхневих плівок виникає за рахунок протікання різних процесів: механічного руйнування під час замикання контактів, випалювання електричною дугою комутації, фретінг.

При механічному руйнуванні ступінь руйнування плівок визначається перш за все швидкістю руху рухомого контакту та його масою, геометрією поверхні, контактним натиском.

При різних струмах навантаження і товщинах плівок протягом часу контактний опір значно зменшується, причому ступінь зменшення

збільшується з ростом величини струму. Вплив струму на процес зменшення контактного опору замкнених контактів зменшується з часом і припиняється приблизно через 1 хв. з моменту вмикання апарату. Аналіз осцилограм контактного падіння напруги показує, що воно характеризується несинусоціальністю і несиметричне по відношенню до нульової відмітки. Це говорить про залежність контактного падіння напруги від полярності прикладеної напруги, її величини і температури контактних поверхонь. Внаслідок теплової і електричної дії оксидні шари протягом часу руйнуються, при цьому осцилограми контактного падіння напруги наближаються до симетричної синусоїди, яка характерна чисто механічному контакту. Такий процес руйнування плівок відомий і носить назву фритінгу. Таким чином, аналізуючи характер руйнування плівок фритінгом, можна зробити висновок, що досягти значного руйнування поверхневих плівок можна в комутаційних апаратах, які комутують електроустановки з великими пусковими струмами: електродвигуни, трансформатори, тощо.

Таким чином, як показали проведені лабораторні і виробничі дослідження вплив агресивних газів і парів на надійність контактування, перехідний опір контактів в результаті впливу агресивного середовища значно збільшується, причому інтенсивність його збільшення залежить як від складу контактного матеріалу, так і від складу виробничої атмосфери. Спечені контактні матеріали на основі міді з добавками молібдену, триоксиду молібдену, нікелю та графіту по корозійній стійкості в атмосфері сірководню, аміаку, при підвищеній вологості адекватні з відповідними характеристиками серійних срібно-мідних контактів.

Опір корозії тісно пов'язаний з властивостями контактних матеріалів. З однієї сторони спорідненість матеріалу контактів до кисню, сірководню та аміаку, з другої властивості плівок: провідність, здатність дисоціювати і випаровуватися, механічна міцність, структура.

Проведені дослідження с сульфідними плівками товщиною до 600 нм. дозволяють виявити, що величина руйнування оксидних шарів швидко зростає в значній мірі товщиною та складом плівки, а також швидкістю вмикання і величиною струму навантаження.

Руйнування поверхневих плівок виникає за рахунок протікання різних процесів: механічного руйнування під час замикання контактів, випалювання електричною дугою комутації, фритінг.



При механічному руйнуванні ступінь руйнування плівок визначається перш за все швидкістю руху рухомого контакту та його масою, геометрією поверхні, контактним натиском.

Таким чином, як показали проведені лабораторні і виробничі дослідження вплив агресивних газів і парів на надійність контактування, перехідний опір контактів в результаті впливу агресивного середовища значно збільшується, причому інтенсивність його збільшення залежить ж від складу контактного матеріалу, так і від складу виробничої атмосфери.

Так ж, оксидні плівки руйнуються під впливом механічних зусиль і струмового навантаження, то доцільно застосовувати розроблені матеріали на основі міді для контактів автоматичних вимикачів, які відзначаються великим контактним натиском та досить високою швидкістю руху контактів, які комутують електроприводи, трансформатори, тощо.

Таким чином, враховуючи специфічні особливості роботи контактних апаратів в сільськогосподарському виробництві слід зробити такі висновки:

1. Контактні матеріали повинні мати, високу стійкість до дії агресивних газів та парів при високій відносній вологості і забезпечувати надійність контактування в цих умовах.

2. Електричні апарати, що випускаються промисловістю і широко застосовуються у сільськогосподарському виробництві не відповідають вимогам щодо захисту від впливу агресивного навколишнього середовища.

3. Проведені дослідження дозволяють стверджувати, що з метою суттєвого зменшення витрат дорогоцінних металів необхідно:

– виготовляти контактні вузли з ресурсом по зносостійкості відповідно до фактичних режимів роботи сільськогосподарського технологічного обладнання, величина якого повинна бути для більшості апаратів на порядок меншою в порівнянні з апаратами в промисловості. Так, наприклад, 73 % апаратів необхідно виготовляти із зносостійкістю 50000 ком., 15 % – 15000 ком., що дасть можливість зменшити витрати срібла в електричних апаратах сільського господарства в 4 – 5 разів;

– розробляти схеми керування технологічним обладнанням з мінімальною кількістю пар контактів, використовуючи при цьому можливості додаткових контактів та розчіплювачів для виконання функцій блокування, захисту та сигналізації.

## 6.7 Обґрунтування типу матеріалу та технології його виробництва залежно від сфери застосування контактної вузла

Для надійної роботи комутаційних апаратів їх контактні матеріали повинні протидіяти впливу електричної дуги, хімічно і біологічно-агресивній атмосфері і механічним навантаженням. В загальному вигляді контактні матеріали повинні характеризуватися наступними фізичними параметрами:

- стабільність перехідного опору;
- висока питома електропровідність;
- висока ерозійна стійкість;
- висока корозійна стійкість;
- високі лугостійкість і протидія зварюванню;
- поєднання механічної міцності і високої пластичності.

Практично неможливо підібрати універсальний матеріал, який би відповідав всім названим вимогам, тому в залежності від функціонального призначення контактної вузла приходиться приймати компромісне рішення. Контакти автоматичних вимикачів, які працюють в області великих струмів, (вмикання-вимикання струмів короткого замикання) повинні перш за все забезпечувати стабільність перехідного опору при впливові агресивних газів і парів в поєднанні з високими дугостійкістю та стійкістю до зварювання. Таким чином до контактних вузлів висуваються наступні вимоги.

### Вимоги до конструкції

- контактори повинні виготовлятися кліматичного виконання в залежності від місця розташування при експлуатації;
- конструкція контактора повинна бути зручною для монтажу і обслуговування;
- всі різьбові з'єднання повинні бути виготовлені так, щоб не було самовідгвинчування;
- поверхні деталей, які піддаються корозії, повинні мати захисне покриття;
- конструкція повинна забезпечувати можливість періодичного змащування частин, які труться;
- контактні з'єднання повинні бути виконані так, щоб не було зниження контактної натиску в процесі експлуатації;
- провід, шини повинні затискуватися між металевими деталями;
- металева оболонка контактора повинна бути виготовлена так, щоб виключала можливість переходу на неї дуги;

– всі контакти вважаються електричне незалежними, тому повинні бути розраховані на одночасну комутацію в режимах, для яких контактори призначені.

#### Вимоги до електричних параметрів

- кількість циклів оперування, яке визначає комутаційну зносостійкість, повинно установлюватись залежно від категорії застосування;
- ізоляція повинна бути розрахована на номінальну напругу;
- за умовами нагрівання контактори повинні бути розраховані на підключення зовнішніх проводів, поперечний переріз яких не менше найменшого розміру, який допускається по нормах нагрівання проводів;
- контактори повинні бути стійкими при протіканні сквозного струму протягом установленого часу і пікового струму;
- потужність контактора установлюється технічними умовами.

#### Вимоги по стійкості до зовнішніх факторів

*Контактори повинні бути призначені для роботи:*

- при дії механічних факторів зовнішнього середовища по ГОСТу 17516-72;
- при температурі зовнішнього середовища по ГОСТу 15150-69 від -45°C до +45°C;
- при відносній вологості не більше 90 % при температурі 20 °C та не більше 50 % при температурі 40 °C;
- при відсутності сонячної радіації;

#### *Вимоги щодо надійності*

Установлені такі показники надійності:

- ймовірність безвідмовної роботи;
- гама-процентний ресурс.

Допускається, крім цих показників, використовувати такі згідно ГОСТу 23642-79

- установлена напрацювання до відмовлення;
- установлений термін служби до відмовлення.

Перехідний опір, як частина контактного опору залежить від фактичної площі дотику контактів і від питомого опору контактного матеріалу. Площа фактичного проходження електричного струму залежить від величини контактного натиску і з ростом контактного натиску збільшується по експоненціальній залежності до того часу, поки напруга стиску не буде вищою межі текучості матеріалу. З другої сторони перехідний опір залежить від опору

граничного шару, який визначається його складом (наявність оксидних, сульфідних та ін. плівок, пилу тощо) і питомим електроопором.

Найбільш поширеним контактним матеріалом, який використовується в автоматичних вимикачах є композиційні матеріали на основі срібла типу СН.

Аналіз цих композиційних матеріалів показав, що використовуються дво- та однофазні системи, які мають гетерогенну структуру. Відсутність взаємодії елементів в твердому і рідкому стані срібла з нікелем, срібла з графітом, дозволяє повністю реалізувати властивості кожного із складових матеріалу, які вводяться в матеріал.

Вищеназвані срібномісткі контактні матеріали, які широко застосовуються в електричних апаратах, відзначаються серйозним недоліком - низькою стійкістю до утворення сульфідів при взаємодії з сірчаними сполуками (сірководнем), що особливо проявляється при роботі в умовах тваринництва. Суцільна ізолююча плівка із сульфиду срібла ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), яка утворюється на поверхні контакту під впливом сірководню, володіє високими електричною та механічною міцністю, що в кінцевому результаті приводить до виходу з ладу контактних вузлів.

Враховуючи вимоги до контактних вузлів для роботи в сільському господарстві, які досліджені раніше з метою економії благородних металів, розробки контактних матеріалів доцільно проводити в напрямленні покращення властивостей спечених матеріалів на основі міді і перш за все багатокомпонентних матеріалів на основі міді і тугоплавких сполук.

Мідь є найбільш близьким матеріалом до срібла за фізико-механічними властивостями. Але її основний недолік полягає в тому, що в повітряній атмосфері вона окислюється і з зростанням температури процес окислення інтенсифікується. Внаслідок цього на поверхні міді з'являються ізоляційні плівки, які порушують роботу контактів, приводять до відказів в роботі.

При розробці матеріалу для контактів нами прийнята мідь як основа, для забезпечення високих показників по тепло- і електропровідності. Замість нікелю вводиться молібден, який не взаємодіє з міддю ні в твердому, ні в рідкому стані, підвищує значно твердість, міцність та лугостійкість. Для стабілізації контактного опору були введені легуючі домішки триоксиду молібдену  $\text{MoO}_3$  і графіту. Ці домішки також підвищують електроерозійну стійкість і знижують силу зварювання.

Одночасне введення  $\text{Mo}$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{C}$  надають матеріалу необхідні властивості, які необхідні для матеріалів автоматичних вимикачів. Механізм формування композиції із  $\text{Mo}$  і  $\text{Cu}$  визначається процесами, які проходять на

поверхнях розподілу фаз, а саме, змочуванням та адгезією. Відсутність взаємодії між компонентами композиції Мо-Си і неповне розтікання міді на поверхні молібдену утруднює отримання беспорестих матеріалів.

Для кращої взаємодії на межі розділу Си-Мо в композицію вводиться і нікель в межах 0,8 – 1 % мас.

Молібден, як тугоплавка складова композиції визначає механічну міцність матеріалу.

Легування нікелем помітно впливає на механізм руйнування контактів, що визначає їх електроерозійну стійкість. З введенням в композицію нікелю і зростає розчинність молібдену в рідкій фазі і змінюється структура робочої зони контакту.

## 7 МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ МЕТАЛОПОКРИТТЯ ТА СТРУКТУРНІ СХЕМИ КЕРУВАННЯ КІНЕТИКОЮ УТВОРЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІДНОВЛЕННЯ КОНТАКТНИХ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

### 7.1 Моделі формування покриттів

В процесі напилення покриття утворюється на окремих розплавлених чи близьких до цього стану металевих частинок. Ці частини з високою швидкістю співударяються і нашаровуються на поверхню основи, яка в процесі напилення підвищується до 200 °С і утворюють пляму в формі круга.

Розподіл частинок по діаметру круга підкоряється закону Гаусса. Якщо проводити напилення в точку на плоску основу по нормалі до її поверхні за час  $dt$ , то зміна товщини покриття  $dy$  в залежності від центра круга можна представити в наступній залежності:

$$dy = y_0 e^{-\frac{r^2}{2G^2}} dt \quad (7.1)$$

де  $y_0$  – швидкість зростання покриття в центрі круга;  $G_0$  – стандартне відхилення, замість якого можна використовувати радіус розсіювання  $\rho = \sqrt{2G}$ .

В такому випадку можна записати:

$$dy = y_0 e^{-\frac{r^2}{\rho^2}} dt \quad (7.2)$$

В координатах, віддалених від центра на віддалі  $\rho$  і  $2\rho$ , товщина покриття складає 36,8 % і 1,8 % (рис. 7.1) від товщини в центрі напиленого шару. Величина  $\rho$  залежить від форми сопла горілки, тиску стиснутого повітря, віддалі напилення та інших факторів.

При великих віддалях напилення покриття будуть пористими. Для зменшення пористості напиленого матеріалу перед горілкою встановлюється екран, який відсікає потік периферійних частинок і покриття формується тільки частинками, які рухаються в центральній зоні струменя.

Для дослідження процесів, які необхідно вивчити при напиленні, нагрів частинок металу, що напиляються, їх рух від горілки до основи і співудари з нею, структури перехідної зони між покриттям і основою і зв'язку між

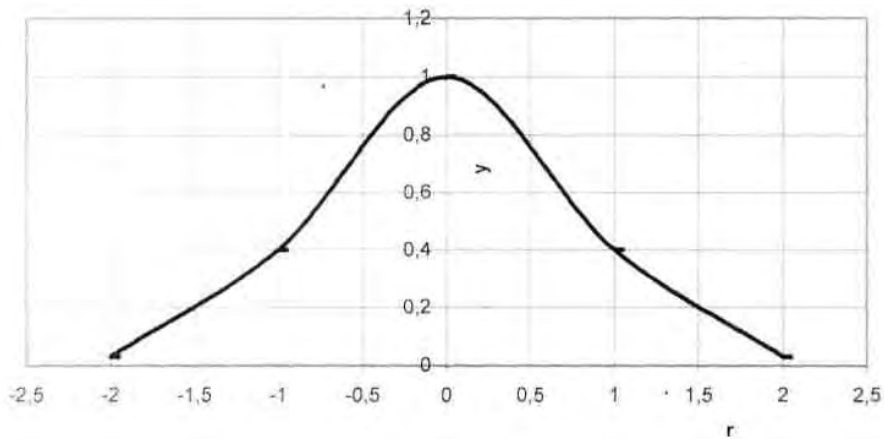


Рисунок 7.1 – Розподіл товщини покриття в залежності від радіусу розпилення

напиленими частинками. На ці процеси впливають наступні фактори: метод і технологія наплення, розміри і форма частинок які напеляються у вигляді порошку, густина, питома теплоємність, теплопровідність, ступінь проплавлення, хімічні реакції при високих температурах матеріалів які напеляються та їх хімічна активність по відношенню до матеріалу основи.

На рис. 7.2. показано електронограма молібденового покриття, яке було отримане за один прохід газоплазмовим напленням провідника з вуглецевої сталі, що містить 0,15 % С, на сталю поверхню. Видно, що по краях покриття напелені частинки слабо з'єдналися з поверхнею основи. Як наслідок, при подальшому проході, коли на ці ділянки попадуть інші частинки, в покритті утворюються пори. Тому при великих відстанях наплення покриття отримуємо пористими. Для зменшення пористості напленого матеріалу перед пальником розташовують екран, який відсікає потік периферійних частинок і покриття формується тільки частинками, що рухаються в центральній зоні струменя і проходять, наприклад, через круговий отвір в екрані. Однак на практиці такі екрани не знайшли застосування.

На рис. 7.3, а, б показані мікроструктури молібденових покриттів, напелених газоплазмовим і плазмовим методами. Із рисунку видно, що покриття являють собою багатошарову структуру, утворену деформованими плоскими частинками. В покриттях між зернами міститься велика кількість пор. Покриття наносили плазмовим напленням. В ньому видно розсіяні тверді частинки карбідів і вольфраму.

Звичайно вважають, що частинки між собою з'єднуються механічно. Однак вони можуть містами сплавлятися або з'єднуватися під дією сил Ван-дер-Ваальса. Структура з'єднань між частинками на сьогодні детально не вивчена.

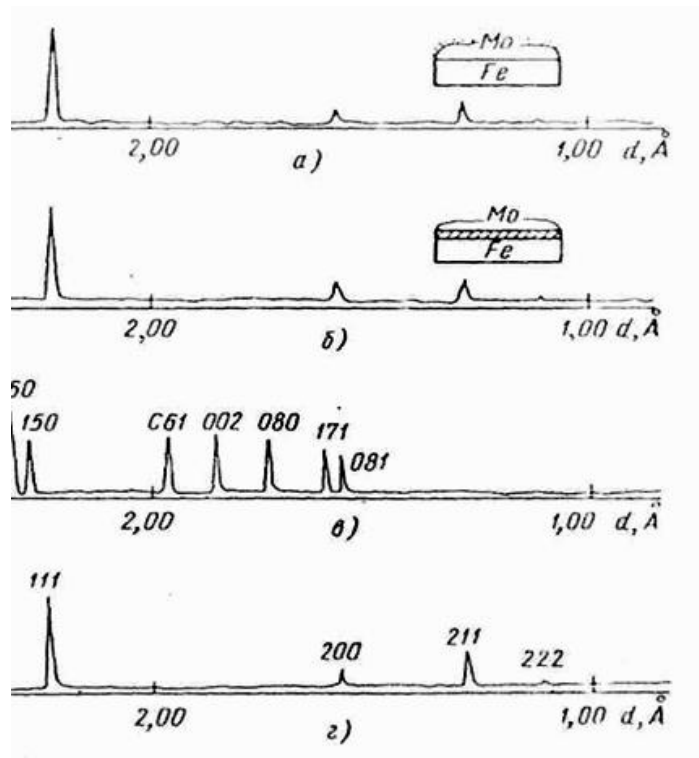


Рисунок 7.2 – Рентгенограми молибденового покриття:  
 а – після напилення; б – після полірування поверхні; в –  $\text{MoO}_3$ ; г – дослідні зразки на основі міді

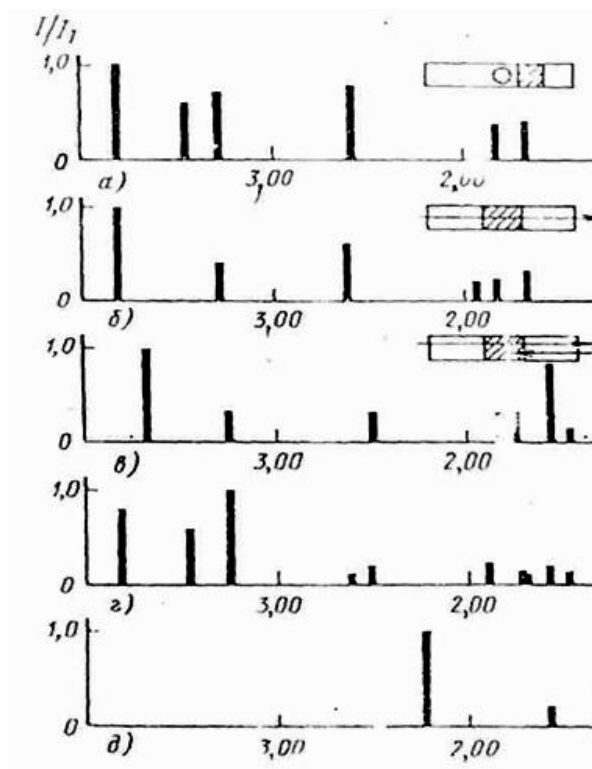


Рисунок 7.3 – Електроннограма молибденового покриття ( $d$  – крок решітки,  $I/I_1$  – відносна інтенсивність)  
 а – після напилення; б – після полірування поверхні; в –  $\text{MoO}_3$ ; г – дослідні зразки на основі міді



Вище вже згадувалось про те, що при русі напилюваних частинок в високотемпературному газовому потоці поверхня частинок металів і сплавів окислюється. В результаті цього кожна частинка покривається плівкою оксидів, яка остається на межах частинок в покритті. Тому, в напилюваному матеріалі з'єднання частинок, крім механічного зчеплення, відбувається і через оксиди. В місцях руйнування оксидних плівок відбувається сплавлення металічних частинок. При напиленні металів в контрольованій атмосфері, що виключає їх окислення, в процесі формування покриття відбувається сплавлення напилюваних частинок.

При напиленні молібдену на повітрі відбувається інтенсивне окислення рухомих частинок. При цьому продукти окислення легко випаровуються і кількість оксидів в покритті між зернами незначна. На рис. 7.2, а, б приведені рентгенограми покриттів із молібдену, нанесених плазмовим напиленням. Рентгенограма на рис 7.2, отримана для поверхні покриття після напилення, а рентгенограма на рис 7.2, для проміжного покриття, отриманого після полірування. Ці рентгенограми співставленні з стандартними рентгенограмами ASME для  $\text{MoO}_3$  (в) і молібдену (г). Із співставлення видно, що покриття складається із молібдену, а наявність  $\text{MoO}_3$ , не спостерігається.

На рис. 7.3, а, б, в представлені електроннограми, отримані в потоці електронів (довжина хвилі  $10^{-7} - 10^{-5}$  см), які в порівнянні з рентгенівськими променями мають більш низьку проникаючу здатність. Електроннограма на рис 3.3а отримана для покриття, напиленою нерухомим пальником, і яке відповідно, безперервно знаходилось під дією потоку. Електроннограма на рис. 7.3б відповідає покриттю, отриманому за один прохід, а електроннограма на рис. 7.3в – за два проходи, причому шар, напилений в другому проході, трохи зсунутий по відношенню до першого. Електроннограма (в) знімалась для поверхні покриття, напиленого за перший прохід, але при другому проході поверхня потрапила під дію плазмового потоку. Отримані результати співставленні з стандартними рентгенограмами ASME для  $\text{MoO}_3$  (г) і молібдену (д). На всіх зразках виявлено, що в покритті наявний  $\text{MoO}_3$ . На основі цього можна зробити висновок про те, що в молібденових покриттях між зернами оксиди знаходяться у вигляді дуже тонких плівок.

Матеріал покриття, яке формує напилення контактів, має дрібнокристалічну структуру, що підтверджується рентгенограмами.

## 7.2 Дослідження перехідної зони

Будова перехідної зони між покриттям та основою досліджено ще не достатньо повно внаслідок великої складності точного вивчення структури граничних ділянок. Через те, що матеріали покриття та основи в основному мають різні властивості, а саме різну твердість, при шліфуванні, що проводиться перед металографічними дослідженнями, на межі переходу утворюється сходи́нка, яка не дозволяє одночасно проводити травлення покриття та основи. Роздільне травлення шліфа повітряної порожнини, яка при вивченні мікроструктури виглядає як канавка. Друга причина полягає в тому, що в більшості випадків товщина шару, утвореного на межі розподілу в результаті взаємодії часток з матеріалом основи, дуже не велика, що не дозволяє провести ґрунтовне дослідження.

З'єднання напиленого покриття з основою здійснюється за рахунок механічного зчеплення часток, що напиляються з виступами та впадинами на поверхні основи, утвореними попередньою обробкою.

Механічне зчеплення посилюється в результаті сплавлення або хімічної взаємодії часток, що напиляються з основою. При вивченні контактної зони між покриттям і основою необхідно також звернути увагу на ділянки, де з'єднання проходить по тонких плівках окислів, утворених на поверхнях напилених часток і основи.

На міцність зчеплення покриття з основою впливають і фізичні зв'язки, які проявляються у вигляді молекулярних зв'язків. Вони з'являються у випадку, коли матеріал що напилюється та матеріал основи мають решітку приблизно однакового розміру. На ділянках основи, поверхня яких має підвищену активність, характер з'єднання визначається дифузійними процесами. В даний час такий вид з'єднання для напилених покриттів в достатній мірі не вивчений.

Високу міцність зчеплення із сталлюю основою мають молібденові покриття.

На рис. 7.4 показано характер руйнування покриття з вуглецевої сталі товщиною 0.5 мм, нанесеного на основу з низьковуглецевої сталі, на якій знаходиться різьба. При визначенні міцності зчеплення руйнування зразка відбулося як по межі між поверхнею основи і напиленими частками, так і по напиленому матеріалу. При напиленні на основу тонкого прошарку молібдену для такого ж покриття з вуглецевої сталі товщиною 0,5 мм відшарування часток молібдену від основи після випробувань зразка на міцність зчеплення не

відбувалося (рис. 7.5). Руйнування покриття проходить в місцях з'єднання зерен молибдену з зернами напильної вуглецевої сталі.

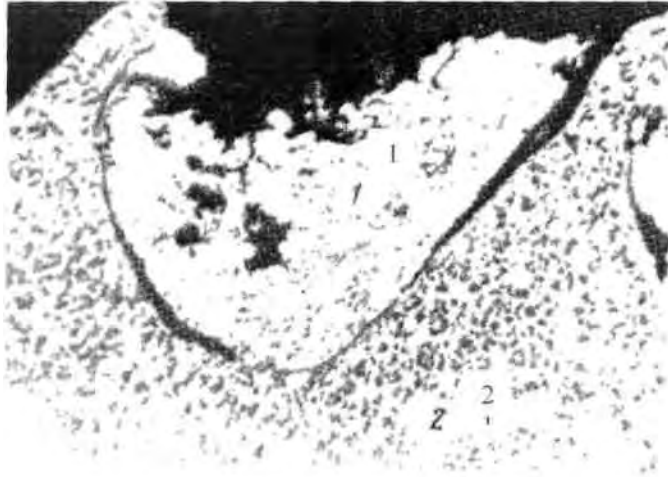


Рисунок 7.4 – Руйнування покриття з сталі, напильного на основу з низьковуглецевої сталі,  $\times 60 \times 3/5$

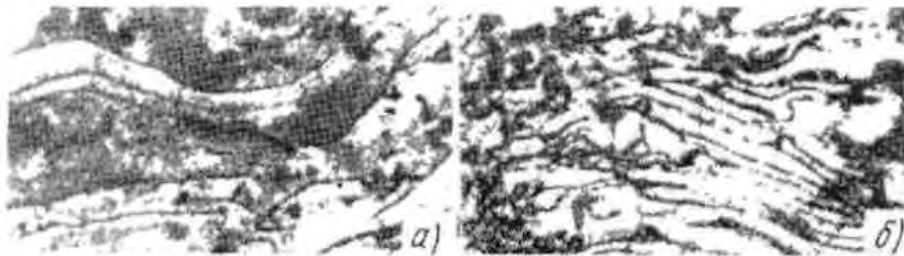


Рисунок 7.5 – Мікроструктура напильного молибденового покриття  $\times 400 \times 7/10$ :

а – проволочне газоплазмове напильнення; б – плазмове напильнення

Гарне зчеплення молибдену з поверхнею сталевих основи пояснюється великим тиском парів його окислів. При русі часток молибдену від зрізу сопла горілки до поверхні основи проходить їх окислення, яке супроводжується інтенсивним випаровуванням оксидів. В результаті розплавлені частки молибдену в момент зіткнення легко розриваються, і чистий молибден, маючи високу температуру, вступає в контакт з поверхнею основи. Проходить плавлення частинок молибдену з матеріалом основи на деяких ділянках і утворення металевих зв'язків.

На рис. 7.6 приведено мікроструктуру перехідної зони, в якій відбулося з'єднання напильного молибдену з металом основи. Молибден наносили дротяним газоплазмовим напильненням (умови напильнення: діаметр дроту 2мм, горілка Mark 33, тиск ацетилен  $1.1 \text{ кгс/см}^2$ , тиск кисню  $1.6 \text{ кгс/см}^2$ , тиск стисненого повітря  $3.2 \text{ кгс/см}^2$ , відстань напильнення 150 мм) на основу з низько

вуглецевої сталі, поверхня якої була піддана хімічному поліруванню. З рисунку видно, що в зоні покриття з основою утворився проміжний шар. Товщина проміжного шару складає 1мкм. Згідно досліджень проміжний шар складається, перш за все, з  $Fe_3Mo_2$  та  $Fe_7Mo_6$

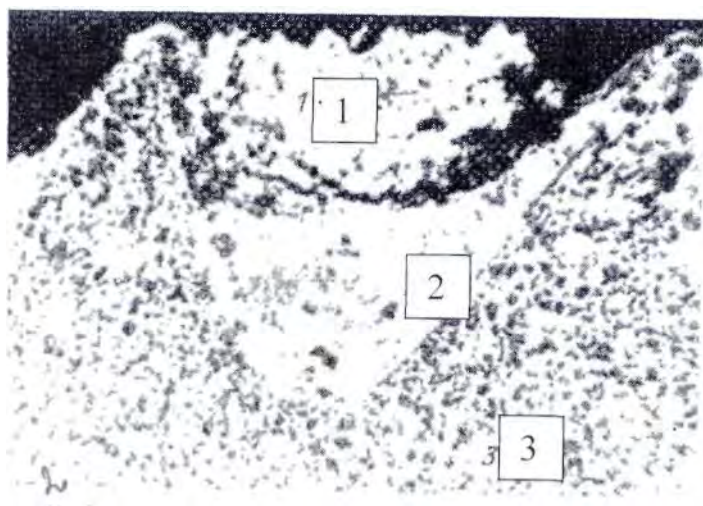


Рисунок 7.6 – Руйнування покриття з сталі, напиленого на основу з низьковуглецевої сталі з молибденовим підшаром,  $\times 60 \times 3/5$ :

1 – сталеве покриття; 2 – підшар з молибдену; 3 – основа

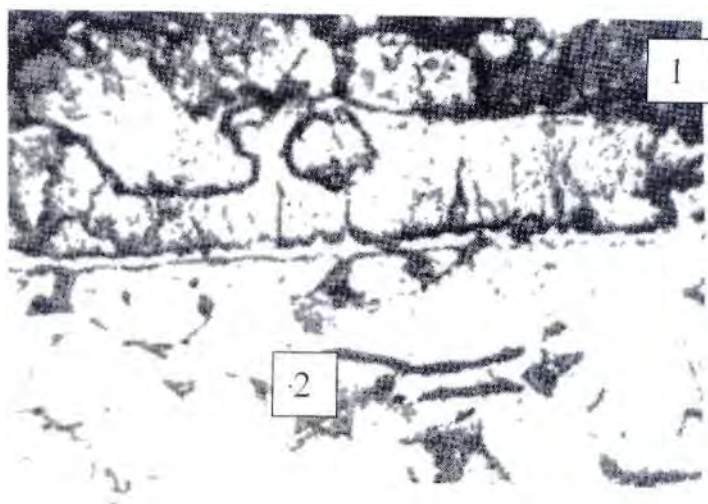


Рисунок 7.6 – Мікроструктура перехідної зони молибденового покриття, напиленого на поліровану поверхню основи з низьковуглецевої сталі,  $\times 920 \times 35/5$ :

1 – молибденове покриття; 2 – низьковуглецева сталь

На рис. 7.7 представлено електронну мікрофотографію молибденового покриття, нанесеного плазмовим напиленням на основу з низьковуглецевої сталі. Ділянки проплавлення показані стрілками.

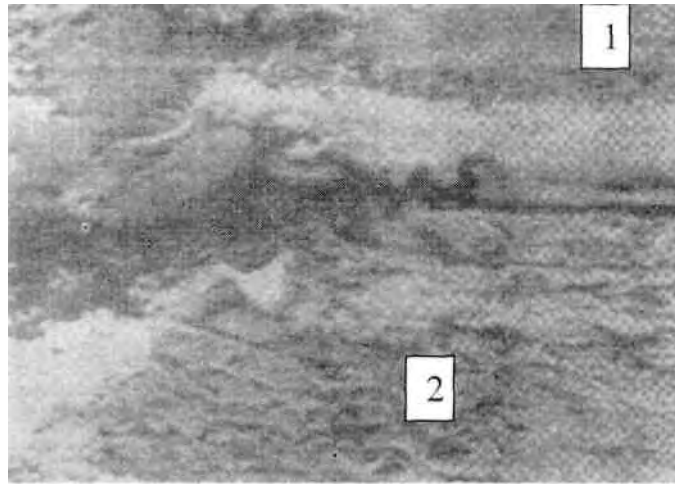


Рисунок 7.7 – Електронна мікрофотографія проміжного слою між молібденом покриттям і покриттям і основою з низьковуглецевої сталі,  $\times 7500 \times 3/5$

1 – молібденове покриття; 2 – низьковуглецеве покриття

Якщо проводити плазмове напилення вольфраму на попередньо нагріту до  $1120 - 1480\text{ }^{\circ}\text{C}$  вольфрамову пластину в середовищі особливо чистого азоту, то можна отримати покриття, сплавлене з основою. При температурі попереднього підігріву вище ніж  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  між вольфрамовим покриттям та вольфрамовою основою утворюється зона твердого розчину. На рис. 7.8 показано структуру перехідної зони між вольфрамовою основою і покриттям.

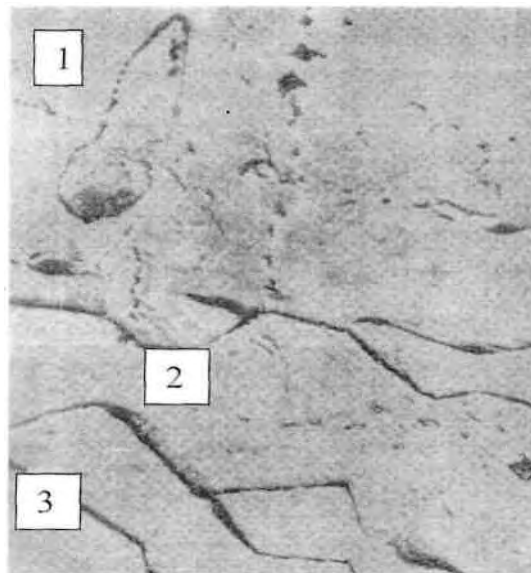


Рисунок 7.8 – Електронна мікрофотографія вольфрамового покриття, напиленого на попередньо підготовлену основу з вольфраму,  $\times 10000 \times 3/5$

1 – напилене покриття; 2 – поверхня основи; 3 – основа

Молібденове покриття має дуже добре з'єднання з основою якою є алюміній. Однак з міддю та мідними сплавами міцність зчеплення його низька.

При напиленні молібдену на мідь через його високу теплопровідність проходить швидке охолодження часток молібдену в момент зіткнення з основою і розплавлений перехідний шар не утворюється.

### 7.3 Загальні відомості та будова покриття

Газоплазмове напилювання є найбільш перспективним з газотермічних методів нанесення покриттів. Суть цього методу – в розплавленні матеріалу, який наноситься за допомогою високотемпературного струменя, що утворюється плазмовою горілкою і наступним розпиленням розплаву потоком іонізованого газу. Електрична дуга в плазмових горілках збуджується між катодом і водоохолоджувальним соплом-анодом. Крізь електродугову камеру продувається плазмоутворюючий газ, який частково іонізується і при високій температурі виходить із сопла з великою швидкістю. Струмінь плазми, що отримується таким чином, характеризується температурою до 5000 – 15000 °С і швидкістю, що в декілька разів перевищує швидкість звуку. До високотемпературного газового потоку вводиться у вигляді порошку або проводу напилений матеріал. Швидкість частинок при напилюванні знаходиться в межах 100 – 400 м/с. Принципова схема газоплазмового напилювання приведена на рис. 3.10.

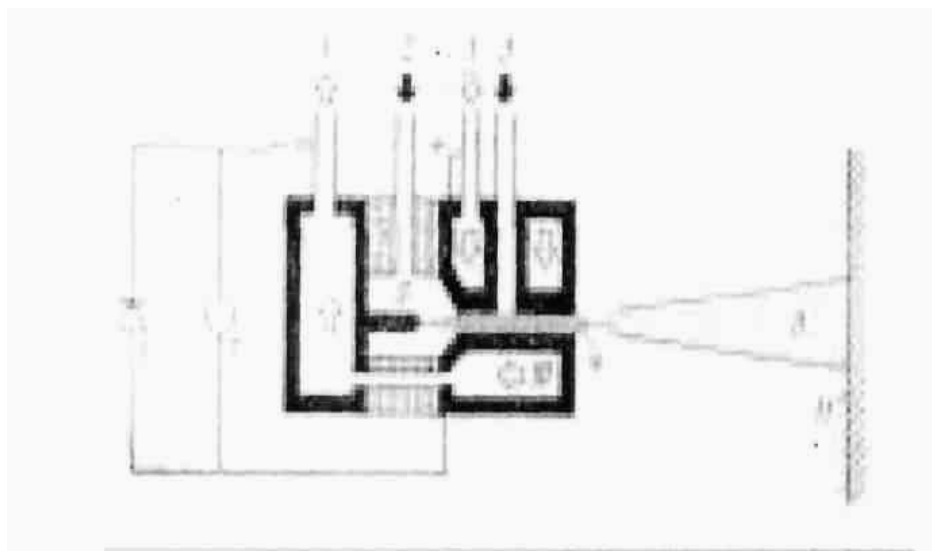


Рисунок 7.9 – Принципова схема газоплазмового напилення:

1 – підвід і відвід охолоджувальної води; 2. – підвід плазмоутворюючого газу; 3 – подача порошкового матеріалу; 4 – плазмовий струмінь; 5 – ізолятор; 6 – випрямляч; 7 – осцилятор; 8 – струмінь з порошковим матеріалом; 9 – вольфрамовий катод; 10 – мідний анод; 11 – підкладка (контактотримач)

Як плазмоутворюючі матеріали отримали поширення вода і гази: аргон, чистий азот, водень, гелій, а також їхні суміші. Продуктивність установок газоплазмового напилювання коливається від 0,5 до 10 кг/год, міцність зчеплення напиленого покриття досягає 60 МПа.

Процесу газоплазмового напилювання притаманний ряд переваг: універсальність плазмового методу, що забезпечує можливість нанесення покриттів із різноманітних матеріалів; можливість збереження особливостей структури і властивостей матеріалів основи (контактотримачів електричних апаратів); можливість нанесення покриттів на контакти складної поверхні і форми.

В подальшому передбачається створення плазмотронів потужністю 160 – 300 кВт, збільшення швидкості напилених частинок до 1000 м/с, досягнення продуктивності 15 – 20 кг/год. Це дозволить отримати покриття міцністю 150 МПа і густиною 96%.

*Покриття* – це шаруватий матеріал, що складається з дуже деформованих часток, які з'єднані між собою по контактним поверхням зварними ділянками діаметром  $D_x$  і площею  $F_x = (\pi D_x^2)/4$ , що ілюструється на рис. 7.10. Зварні ділянки не заповнюють всю площину контакту між частками і тому міцність та густина напилених покриттів нижче міцності і густини матеріалу покриття в компактному стані. Міцність самих зварних ділянок залежить від кількості осередків захвату, які утворюються на площі  $F_x$  під час удару, деформації і твердіння часток та визначається розвитком хімічної взаємодії матеріалів в контакту.

В покритті можна виділити структурні елементи, що відображають процеси його формування і розділяються межами розділу з визначеними властивостями. Межа розділу між покриттям і основою 1 (рис. 3.11) визначає міцність зчеплення або міцність з'єднання між ними. Властивості самого покриття обумовлюються міцністю зчеплення часток в ньому 3. Зчеплення покриття і основи називають адгезією, а зчеплення часток в покритті -когезією. Межа розділу між шарами (пошарова границя), що отримана за один прохід розпилювача 2, виникає внаслідок неоднакової тривалості витримки між нанесенням часток в шарі та між шарами. За термін витримки пошарового нанесення поверхня раніше нанесеного шару вкривається забрудненням, окислюється і контактні процеси між нею та напиленими частками утруднюються, що і є причиною виникнення межі.

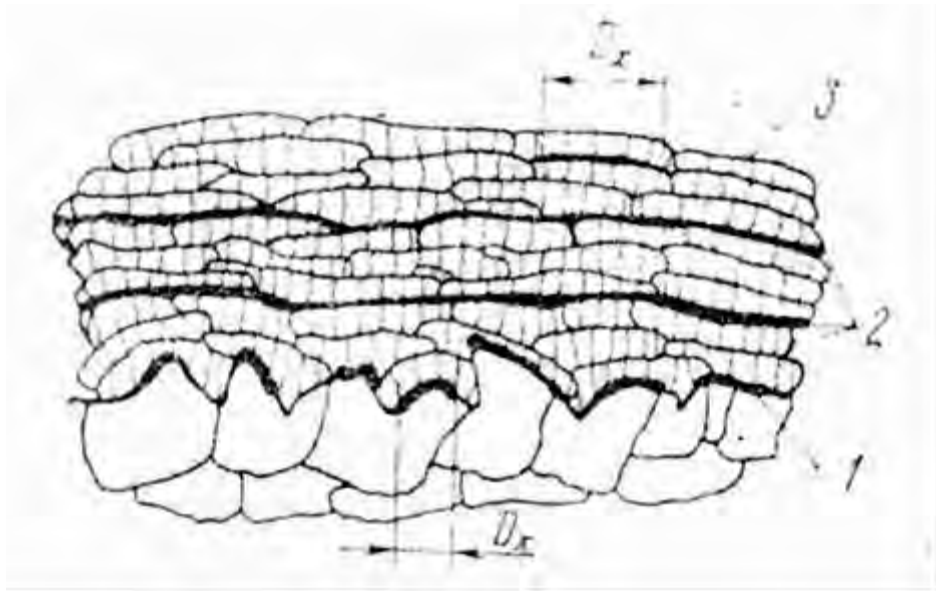


Рисунок 7.10 – Схема структури плазмового покриття:

1 – межа між покриттям і основою; 2 – межа між шарами; 3 – межа (контактна поверхня) між частинками в шарі

Це достатньо гарно видно на мікрошліфі плазмового покриття на рис. 7.11.

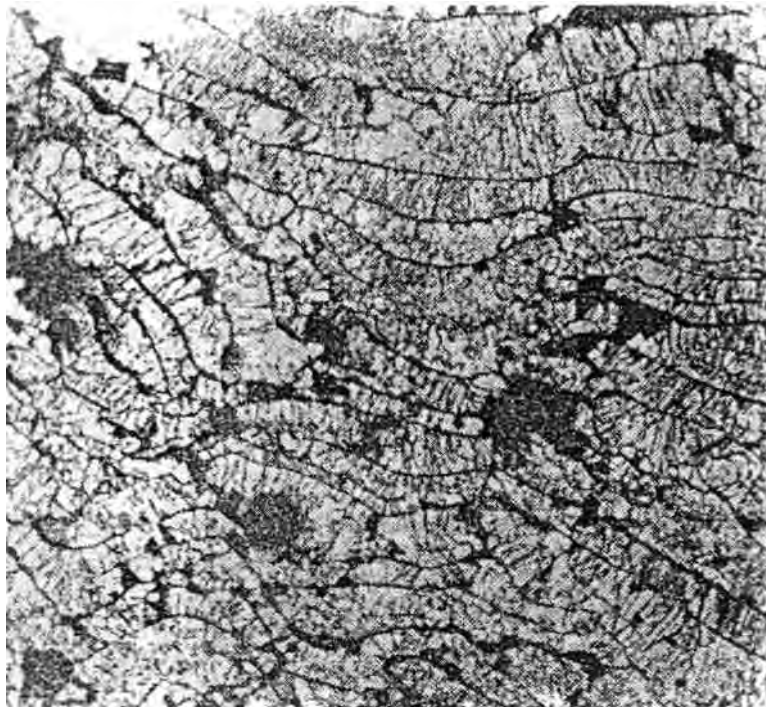


Рисунок 7.11 – Мікрошліф газоплазмового покриття (збільшення  $\times 1000$ , матеріал 85 % Cu + 10 % Mo + 2 % Mo O<sub>3</sub> + 1 % C + 2 % Ni)

Структура шару, який формується за один прохід – неоднорідна і визначається різними розмірами і швидкістю часток, що знаходяться в



периферійній та центральній зонах двофазного потоку (складається з часток та газу). Крім того, спостерігається екрануюча дія периферійних часток по відношенню до часток центральної зони, оскільки периферійні частки при руху напилювача першими лягають на поверхню основи. Нерівномірність енергетичного стану часток і їх розмірів може бути знижена різноманітними технологічними заходами.

Умови утворення межі між шарами і між частками визначається тривалістю перебування в атмосфері. В залежності від розмірів і конфігурації напиленої контакт-деталі, траєкторії переміщення розпилювача “пауза” між моментами накладання шарів може досягати декількох секунд. А це час на декілька порядків більше часу паузи між взаємодією часток в шарі, що нанесений за один прохід. В період між напилюванням шарів на поверхні покриття відбувається абсорбція газів, окислення і відкладання пилоподібних фракцій розпиленого матеріалу та його оксидів.

Утворення покриття послідовним укладанням багатьох деформованих часток неминуче призводить до появи мікропустот, в першу чергу в місцях дотику часток. Покриття формується в атмосфері, тому мікропустоти заповнюються газом, що погіршує властивості меж, особливо пошарових, які мають найбільшу насиченість адсорбованими газами. Внаслідок великої шорсткості покриття і надзвичайно швидкого розтікання та кристалізації часток, в зоні контакт) з поверхнею раніше нанесених часток, залишаються дефекти і порожнини, які утворюються також внаслідок виділення газів, що були розчинені в розплавлених частках. Взаємодія з атмосферою, адсорбція газів і осідання пилоподібних фракцій погіршує властивості пошарових меж.

Структура і властивості покриття залежать від гранулометричного складу напиленого порошку. Зі зменшенням розміру часток порошку поліпшується заповнення покриття – щільність його збільшується, обсяг мікропустот зменшується, будова покриття стає більш однорідною. Однак занадто дрібні порошки не придатні для плазмового напилювання. Мінімальний розмір часток може бути встановлений з раціональних міркувань. Великі утруднення виникають при спробах транспортування та введення в розпилювач часток розміром 10 мкм і менше. Такі порошки не можуть бути заздалегідь підготовлені і вирівняні за розміром часток звичайними методами підготовки порошків, оскільки вони не просіюються на ситах. Дрібні порошки комкуються внаслідок вологості і сил молекулярного зчеплення та утворюють конгломерати з декількох часток при подаванні їх потоком транспортуючого газу. В плазмі вони можуть повністю випаровуватися або втратити швидкість і відхилитися

від заданої траєкторії і не досягти напиленої поверхні контакт-деталі. Звичайно для напилювання рекомендуються порошки з розміром часток 40 – 70 мкм.

Зчеплення між частками в покритті, а також зчеплення між основою і покриттям (відповідно когезії та адгезії) виникають в результаті дії ряду сил: сил механічного зчеплення; слабких невалентних сил взаємодії (типу сил Ван-дер-Ваальса); хімічних сил з'єднання. Сили двох перших типів характеризуються нестабільністю, звичайно мають низький рівень і тому їх не слід брати до уваги при створенні покриттів. Однак при напилюванні на матеріали з сильно розвиненою поверхнею (пориста кераміка тощо) міцність механічного зчеплення покриття з підкладкою може досягати 10 – 15 МПа.

Хімічна взаємодія призводить до приварювання часток, яке виникає шляхом утворення осередків захвату в контакт. Чим більше осередків захвату, тим вище міцність зчеплення часток. Приварювання часток відбувається тільки при підігріванні основи до визначеної температури, яку позначають через  $T_2'$  і називають температурою хімічної взаємодії. Ця температура відповідає заповненню контактної поверхні під часткою осередками захвату на 50 – 70 %. При такому заповненні хімічна взаємодія часток з основою відбувається досить глибоко і для їх видалення необхідно прикласти значне зусилля. При температурі підкладки менше  $T_2'$  частки легко відділяються від основи оскільки хімічна взаємодія не отримує необхідного розвитку.

Температура  $T_2'$ , при якій спостерігається міцне зчеплення існує практично для всіх комбінацій матеріалів часток і основи: елементів, сплавів, простих і складних речовин. Тому напилюванням можна наносити покриття з багатьох неорганічних матеріалів, які можуть бути розплавлені. В залежності від конкретної пари матеріалів покриття – основа температура підігрівання основи  $T_2'$  може лежати як в області від'ємних температур (за 100 градусною шкалою), так і досягати 1000°C і більше.

#### **7.4. Формування покриття та міцність зчеплення в процесі напилювання**

В цілому на процес формування покриття при газоплазмовому напилюванні і в кінцевому рахунку на його якість безпосередньо або опосередковано впливає значна кількість факторів. За оцінками різних дослідників, їх кількість складає від 20 до 60 [14, 26, 32, 48]. В цих умовах важливим є, з однієї сторони, вибір показників процесу формування покриття, а з іншої, - виділення із загальної маси найбільш суттєвих, лімітуючих факторів.

Всі основні фактори можуть бути розділені на декілька основних груп:

1) Фактори, які пов'язані з конструкцією плазмотрону і різних пристроїв для напилювання (конфігурація і довжина каналу, вихідний діаметр сопла; розміщення точки подавання і кут вводу в плазмовий струмінь порошку; діаметр каналу подавання порошку; тиск і витрата охолоджуючої води; режим роботи системи газового охолодження напиленої контакт-деталі тощо).

2) Фактори, які пов'язані з напиленим матеріалом (вид матеріалу – порошок або провід; хімічний склад, розмір і форма проводу або часток порошку; фізико-хімічні і теплофізичні властивості матеріалу тощо).

3) Фактори, які пов'язані з конфігурацією контакт-деталі і властивостями матеріалу контактотримача (товщина, кривизна напиленої поверхні; наявність кромки, пазів тощо; хімічний склад, механічні і теплофізичні властивості основи тощо).

4) Фактори, які пов'язані з попередньою підготовкою контактотримача до нанесення покриттів (шорсткість поверхні; попереднє підігрівання основи тощо).

5) Фактори, що характеризують режим роботи плазмотрону (сила струму і напруга; вид і витрата плазмоутворюючого і транспортуючого газів; витрата порошку або швидкість подавання проводу тощо).

6) Фактори, що характеризують процес взаємного переміщення плазмотрону і напиленого контакту (дистанція напилювання; кут нахилу плазмотрону до напиленої поверхні; характер і швидкість відносного переміщення плазмотрону та контактотримача; кількість проходів плазмотрону тощо).

До речі, ця багатофакторність процесу ще ускладнюється можливістю різноманітних випадкових збурень, неконтрольованою зміною окремих факторів особливо в умовах газоплазмового напилювання ручним способом. Наприклад, ерозія каналу аноду і зношування катоду змінюють конструктивні характеристики горілки, нестабільність електричних параметрів джерела живлення, пульсація в подаванні порошку впливають на умови нагрівання і руху часток тощо.

Дослідження впливу різноманітних факторів на якість та товщину покриття показали, що залежності в багатьох випадках носять екстремальний характер (рис. 7.12). В зв'язку з цим оптимізація процесу газоплазмового напилювання являє собою складну задачу.

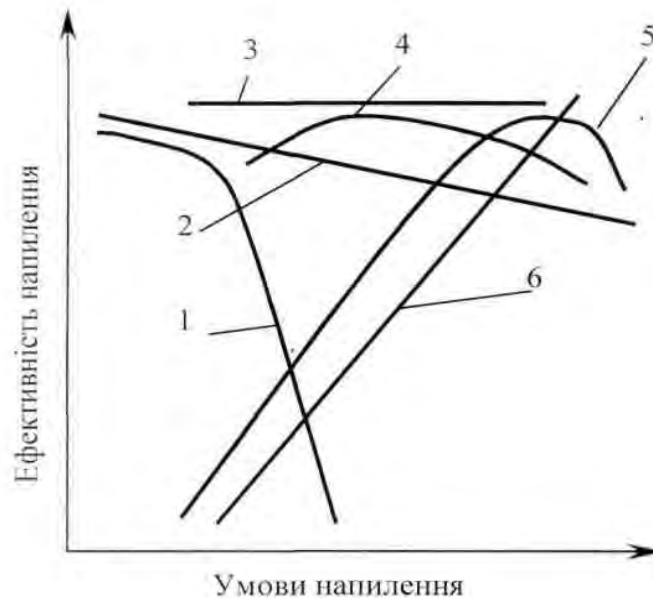


Рисунок 7.12 – Залежність ефективності напилування від умов напилування:

1 – віддаль напилування; 2 – витрати порошку; 3 – швидкість переміщення контакт-деталі; 4 – витрати газу, що транспортує порошок; 5 – витрата робочого газу; 6 – підведена потужність

Якість покриття загалом визначається режимами напилування. Розроблені за останні роки математичні моделі руху і нагрівання часток при напилуванні газоплазмових покриттів [30, 32, 113] дали можливість аналітично оцінити вплив параметрів напилування на якість покриття.

Однією з найбільш важливих експлуатаційних характеристик, що відноситься до якості покриття є міцність зчеплення. Численні дослідження працездатності виробів з покриттям впевнено показали, що не дивлячись на те, що зовнішнє середовище впливає на поверхні покриття (особливо контакти апаратів в тваринництві), основною причиною їх руйнування є недостатній зв'язок між матеріалами покриття і основи [106, 112, 113].

Міцність зчеплення покриття з підкладкою можна визначити як властивість першого порядку (тільки при умові забезпечення її необхідного рівня має зміст визначати інші властивості). Тому питання розробки методики експериментального визначення міцності зчеплення має важливе значення для розвитку процесу газоплазмового напилування в цілому. Можна зазначити, що отримані значення сили зчеплення не відображають величини адгезії, а є скоріше технічною характеристикою. Руйнування носять загалом змішаний когезійно-адгезійний або чисто когезійний характер. Для всіх методик, що застосовуються, характерне розсіювання отримуваних експериментальних даних, причому в деяких діапазонах товщини покриттів воно дуже значне. В

зв'язку з вищенаведеним, показник міцності зчеплення, загалом не може бути використаний одноосібно, для поточного контролю процесу формування покриття і його якості особливо в тих випадках, коли необхідно використання неруйнуючих методів. Проведений нами аналіз теоретичних моделей і наших експериментальних досліджень процесу газоплазмового напилювання показує, що його критеріями можуть слугувати також коефіцієнт використання порошку (КВП) та пористість [49, 59, 107]. Ці параметри також найбільше застосовуються зараз при використанні методів багатofакторного кореляційного аналізу стосовно досліджень і оптимізації процесу газоплазмового напилювання.

Однією з основних характеристик процесу формування покриття є температура, яка виникає в зоні контакту напиленої частки з поверхнею. Звичайно, чим вище температура, тиск в контакті і більший час їх дії, тим в більш повній мірі відбувається активація основи і хімічна взаємодія матеріалів. Але збільшення температури і швидкості часток не обов'язково призводить до інтенсифікації взаємодії. Це відбувається внаслідок розвитку процесів струменевого розтікання і руйнування розплавлених часток при співударянні. За критерієм відсутності розвитку процесів струменевого розтікання часток оптимізують режим газоплазмового напилювання.

Перегрівання напилених часток вище температури плавлення  $T_{пл}$  підвищує міцність їх з'єднання з основою (рис. 7.13, криві 1, 2) і збільшує площу плями хімічної взаємодії. Зростання міцності пояснюється тим, що при перегріванні часток підвищується контактна температура і процес хімічної взаємодії різко прискорюється. Тому покриття слід наносити розплавленими частками і, по можливості, нагрітими до високої температури.

Задача кількісного розрахунку температури контакту  $T_k$  може бути вирішена як задача контактної теплопровідності з урахуванням фазового переходу [73]:

$$T_k = \frac{T_{пл} K_\varepsilon}{K_\varepsilon + \Phi(\alpha)} \quad (7.3)$$

де  $T_{пл}$  – температура плавлення частки;  $K_\varepsilon = b_q / b_n$  – коефіцієнт теплової активності частки;  $b_q, b_n$  – коефіцієнти акумуляції тепла частки і поверхні відповідно;  $\Phi(\alpha)$  – таблична функція інтегралу імовірності.

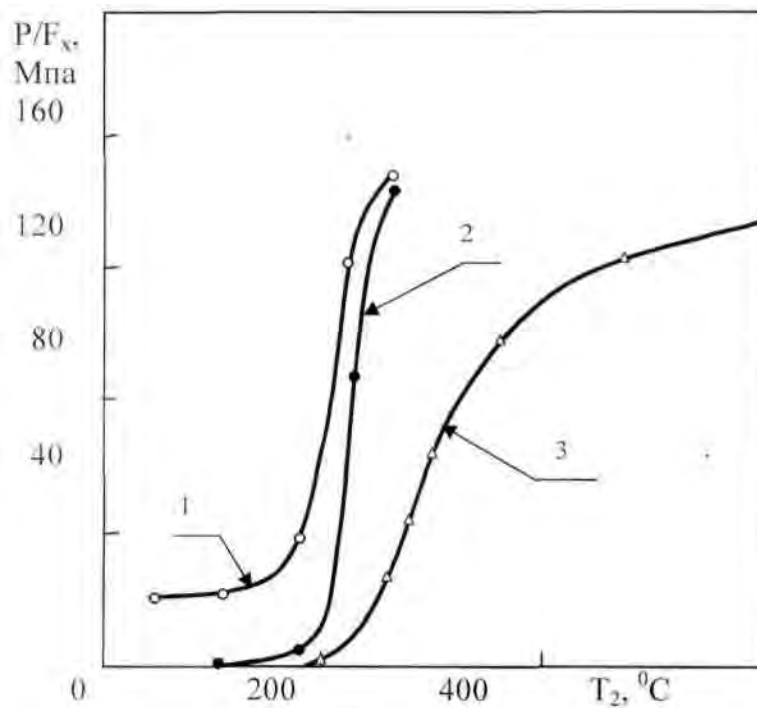


Рисунок 7.13 – Вплив перегрівання срібних часток і швидкості співударяння  $V_1$ , на міцність їх зчеплення  $P/F_x$  зі срібною основою:

1 – напилені частки мають температуру вище температури плавлення ( $V_1 \approx 40$  м/с); 2 – частки розплавлені при температурі, що наближена до температури плавлення ( $V_1 \approx 20 - 40$  м/с); 3 – розплавлені частки співударяються з основою при невеликій швидкості ( $V < 5$  м/с);  $P$  – зусилля відривання;  $\sigma_m$  – тимчасовий опір срібла при розтягу

Розрахунки показують, що температура  $T_k$  при плазмовому напилюванні відповідає твердому стану частки і підкладки. Глибина зони термічного впливу під часткою не перевищує декількох десятків мікрометрів. Тому процеси фізико-хімічної взаємодії при напилюванні, мабуть, не зачіпають основного матеріалу підкладки, а проходять в приповерхневому шарі.

Другим важливим засобом підвищення якості покриття є збільшення швидкості напилених часток, яка сприяє прискоренню і інтенсифікації фізико-хімічних процесів в контактї, а отже, підвищенню міцності та поліпшенню інших характеристик покриття.

Існує межа швидкості часток. При напилюванні зі швидкістю нижче цієї межі міцність їх зчеплення різко знижується. “Повільні” частки мало деформуються і майже не розтікаються при ударі, в результаті чого контактні процеси взаємодії матеріалів частки і основи порушуються. Встановлено, що при швидкості часток  $V_1 = 5$  м/с зростання їх міцності зчеплення з основою уповільнюється (рис. 7.13, крива 3), одночасно дуже слабо збільшується

відносний діаметр плями хімічної взаємодії і за абсолютною величиною не перевищує  $D_x/D < 0,5$ , навіть коли і основа достатньо підігріта.

Таким чином, для розплавлених часток необхідно узгоджувати їх температуру і швидкість. Це основна задача, яку потрібно вирішити при оптимізації режимів напилювання. Ясно також, що активізація основи термосиловою дією розплавлених часток має фізичну межу.

Подібного недоліку не має процес напилювання твердими пластифікованими частками. Збільшення їх швидкості супроводжується збільшення міцності зчеплення покриттів з виходом на насичення, що обумовлене розплавленням порошкового матеріалу при ударі. При цьому міцність зчеплення досягає декількох сотень МПа, тобто вона подібна до міцності самих матеріалів. Але при невеликих швидкостях часток, міцність зчеплення розплавлених часток завжди вище, ніж твердих.

Спроби теоретичного розрахунку величини адгезії, що утворилася між покриттям і підкладкою на основі того чи іншого механізму, показали, що обраховані і виміряні значення відрізняються на один-два порядки. Цю невідповідність можна пояснити двома причинами: структурними дефектами межі розподілу і механічними напругами в системі покриття-основа. До структурних дефектів відносяться неповнота фізичного контакту покриття і основи та неповний розвиток міжатомних зв'язків в зонах контакту. З урахуванням наявності напруги сила зчеплення покриття з основою може бути виражена залежністю [49]:

$$F_{зч} = \frac{A}{r} - f(\tau) \quad (7.4)$$

де  $A$  – робота адгезії;  $r$  – радіус дії міжатомних сил притягіння;  $r(\tau)$  – функція від величини напруги в шарі покриття

В умовах газоплазмового напилювання реальні випадки, коли перевищує за своєю величиною  $A/r$  і відбувається самовільне відшаровування покриття. Тому, питанню вивчення формування при плазмовому напилюванні залишкових напруг в покритті і підкладці приділяється велика увага.

При оптимізації процесу напилювання необхідно також враховувати вимоги мінімізації залишкової напруги. На основі результатів теоретичного аналізу і експериментальних даних запропонований ряд методів керування залишковою напругою в газоплазмових покриттях контактів. До них відносяться узгодження властивостей матеріалу покриття і основи; регулювання термічного впливу струменя плазми і потоку напилених часток;

зниження модуля пружності матеріалу покриття, використання перехідних шарів між основою і покриттям, що забезпечують плавний перехід властивостей від покриття до основи; зміна форми напиленої поверхні. Зниження залишкової напруги також може бути забезпечено при рівномірному охолодженні покриття шляхом високої швидкості охолодження послідовно нанесених тонких шарів або повільним охолодженням покриття з використанням додаткового підігрівання. Найбільш ефективно охолодження формуючого покриття і контактотримача. Для цього збільшують відносну швидкість переміщення розпилювачу і основи, створюють газові екрани, які відхиляють газовий струмінь від деталі тощо. Ефективність тепловідводу підвищується в 15 – 20 разів при підведенні в стиснене повітря 3 – 5 мас.% дистильованої води, а ще більше при напилюванні у воді. Швидкість охолодження впливає також і на фазовий склад покриття, який визначає тип і параметри кристалічної решітки і питомий об'єм матеріалу. Питання зниження залишкової напруги в покритті має особливе значення при відновленні контакт-деталей комутаційних апаратів, що характеризуються складним полем напруги. Коли до цього додати те, що параметри напилювання повинні бути узгоджені зі станом (в першу чергу, з рівнем дефектності) і фізико-хімічними властивостями основи, тоді стає зрозумілою наскільки складна задача оптимізації режимів нанесення і якості газоплазмових покриттів.

Мінімальну електричну потужність, що необхідна для розплавлення часток дисперсного матеріалу при руху їх в об'ємі плазмового струменю, можна оцінити, виходячи з наступного виразу (для одинарної кулястої частки) [60]:

$$\frac{T_{\Gamma} \lambda_{\Gamma}^2}{[1 + f(Re)] V_{\Gamma} \mu_{\Gamma} (1 + x_D)(1 + x_i)} L_q^{\min} \geq \frac{d_q^2 i_{nl}^2 \rho}{273 * 4 Nu^2 \pi R_0^2} = D \quad (7.5)$$

де  $L_q^{\min}$  – найменша довжина траєкторії частки;  $T_{\Gamma}$  – температура;  $\lambda_{\Gamma}$  – теплопровідність;  $V_{\Gamma}$  – витрата порошку;  $x_D$  – ступінь дисоціації;  $x_i$  – ступінь іонізації;  $\mu_{\Gamma}$  – динамічна в'язкість газу;  $d_q$  – діаметр частки;  $\rho$  – густина матеріалу;  $i_{nl}$  – питома ентальпія розплаву при  $T_{nl}$ ;  $T_{nl}$  – температура плавлення частки;  $Re$ ,  $Nu$  – критерії Рейнольдса і Нусельта;  $R_0$  – радіус сопла аноду;  $D$  – параметр важкості плавлення [60]:



$$D = (i_{nl} - n_q Q_{екз})^2 \rho (1 + 0,2Bi)^2, \quad (7.6)$$

де  $Q_{екз}$  – питомий масовий екзотермічний ефект взаємодії;  $n_q$  – ступінь використання екзотермічного ефекту на ділянці нагрівання матеріалу до розплавлення;  $Bi$  – критерій Біо.

Коли  $Bi < 0,2$  параметр важкості плавлення може бути розрахований за таким виразом [60]:

$$D = i_{nl}^2 \rho = \frac{I_{nl}^2}{\rho} = c_e^2 \rho T_{nl}^2, \quad (7.7)$$

де  $I_{nl}$  – об'ємна питома ентальпія розплаву матеріалу частки при  $T_{nl}$ ;  $c_e = i_{nl}/T_{nl}$  – еквівалентна теплоємність розплаву при  $T_{пл}$ .

Вважаючи для виразу (5.3)  $f(Re) = 0$  і  $Nu = 2$ , у випадку аргонового плазмового струменю ( $x_D = 0$ ) отримаємо вираз для оцінки необхідної електричної потужності  $P$  плазмотрону [49]:

$$P = UI \geq 24.4 \frac{V_\Gamma^{1,5} d_q D^{0,5}}{\eta_T R_0 [I_{BH} + 6R_0 (1 - \varepsilon)]^{0,5}}, \quad (7.8)$$

де  $U, I$  – напруга та струм плазмотрону;  $\varepsilon$  – відносна віддаль траєкторії руху частки від осі струменю ( $\varepsilon = R/R_0$ );  $\eta_T$  – термічний коефіцієнт корисної дії плазмотрону.

Статистична оцінка зв'язку між комплексом  $(UI/V_\Gamma^{1,5})(1/d_q)$  і  $D^{0,5}$  по газоелектричному режиму напилювання 36 різноманітних матеріалів (металів, оксидів сплавів, тугоплавких з'єднань) показала наявність залежності, що наближена до лінійної, з коефіцієнтом парної кореляції 0,82 (рис. 7.14).

В загальному вигляді вираз для попередньої інженерної оцінки режиму плазмового напилювання конкретного матеріалу може бути представлений в наступному вигляді [60]:

$$I^n U \geq K_p V_\Gamma^m d_q D^{0,5}, \quad (7.9)$$

де  $K_p$  – постійна плазмотрону, що залежить від складу газу;  $n, m$  – степеневі показники при  $I$  та  $V_\Gamma$ , що обумовлені виглядом залежності  $\eta_T = f(I, V_\Gamma)$ .

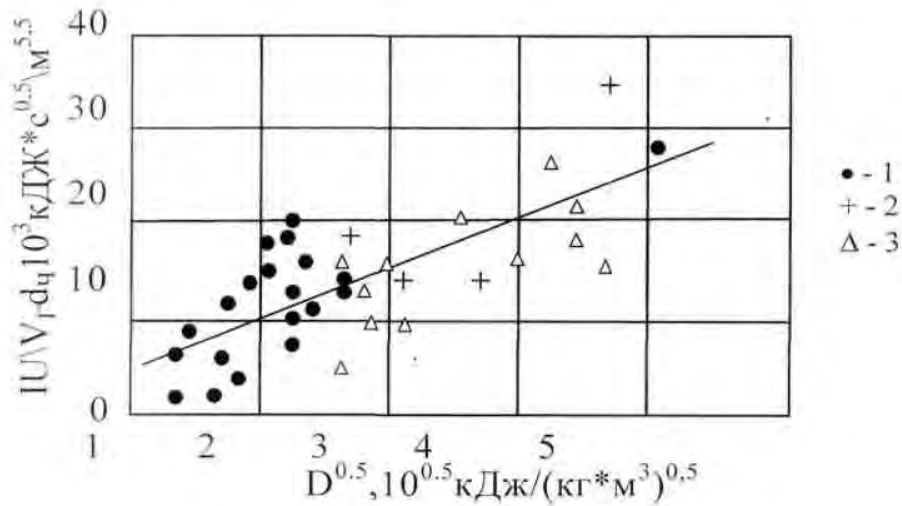


Рисунок 7.14 – Залежність режиму плазмового напилювання матеріалу від параметру важкості плавлення:

1 – метали, сплави, чисті елементи; 2 – оксиди; 3 – тугоплавкі з'єднання

Оскільки напруга  $U$  загалом визначається конструкцією плазмотрону і складом плазмоутворюючого газу, то при наявності матеріалу визначеної дисперсності вибір режиму його напилювання полягає у встановленні оптимальної комбінації сили струму і витрати плазмоутворюючого газу при вихідному мінімальному рівні відношення  $I^n / V_T^m \geq K_p d_q D^{0.5} U^{-1}$ . Нижній рівень витрати газу в багатьох випадках пов'язаний з умовами роботи аноду і оцінюється в межах 25 – 35 дм/хв.

### Способи поліпшення якості покриття при газоплазмовому напилюванні

Для досягнення високої міцності зчеплення газоплазмових покриттів з основою технологічний процес їх нанесення повинен забезпечувати, по-перше, можливість здійснення хімічної взаємодії напилених часток з основою і, по-друге, найбільш повну релаксацію напружень в зоні з'єднання. Виконання цих умов реалізується шляхом застосування ряду технологічних прийомів і методів.

Розроблені методи теоретичного аналізу утворення сил зчеплення напилених часток з поверхнею дозволяють запропонувати ряд рекомендацій по поліпшенню міцності з'єднання плазмових покриттів з основою, які в основному направлені на більш повну реалізацію процесів міжатомної взаємодії при формуванні покриття. Використання цих прийомів призволить, загалом, або до підвищення  $T_k$  або до зниження енергії активації міжатомної взаємодії.

Практично на якість покриття при напилюванні впливають такі технологічні операції:

- підготовка порошкових матеріалів;
- підготовка поверхні основи перед напилюванням;
- вплив на міцність зчеплення в процесі напилювання;
- наступна обробка газоплазмових покриттів.

В сучасних установках плазмового напилювання якісні покриття із металевих матеріалів отримують при напилюванні вузьких фракцій порошку з діапазону розмірів 40 – 80 мкм. При напилюванні керамічних матеріалів (особливо оксидів) існує тенденція зменшення розмірів порошку до 10 мкм.

В загальному вигляді метою підготовки поверхні з'єднання матеріалів – формування властивостей поверхні, що полегшує її активацію в процесі взаємодії. Способи підготовки поверхні за видом основного впливу можна розділити на механічні, фізичні та хімічні. В деяких випадках замість механічних або електричних способів підготовки поверхні на неї напилюють тонкий (0,05 – 0,1 мм) шар молібдену, який володіє властивістю міцно зчіплюватися з досить гладкими шліфованими поверхнями і разом з тим забезпечує хорошу адгезію нанесеного зверху на нього металізаційного покриття.

Важливим також направленням, котре забезпечує подальше збільшення міцності зчеплення покриттів з основою, є вдосконалення наявного і розробка нового обладнання для газоплазмового напилювання. Основні тенденції вдосконалення обладнання пов'язані з рішенням задачі збільшення швидкості напилених часток (застосуванням супутніх, подвійних газових потоків, профілюванням сопел, збільшенням потужності розпилювачів тощо), підвищення температурного рівня процесу (при застосуванні напилення в контрольованих атмосферах), забезпечення можливості напилювання покриттів із дрібнодисперсних порошоків.

Одним із способів зниження пористості і збільшення міцності зчеплення плазмових покриттів є термічна і термомеханічна обробка. Розвиток процесів дифузії призводить до локалізації порожнин і об'ємній взаємодії на межі розподілу “основа-покриття“, виникненню дифузійного прошарку, котрий забезпечує зростання міцності зчеплення. Типовим прикладом подібної обробки є дифузійний відпал основи. Для тугоплавких і криттів, температура плавлення яких вище температури плавлення основи, сьогодні знаходить широке практичне застосування реалізація режиму концентрованим потоком енергії (електронно-променева обробка).

На нашу думку, найбільш перспективним є нанесення покриття з наступним рідиннофазовим спіканням. Суть його заключається в тому, що враховуючи велику тривалість процесу спікання, доцільно проводити термообробку в присутності компоненту з легкоплавкого металу, котрий творює дифузійні зв'язки між частками порошку і основою. При цьому міцність зчеплення підвищується до значень 50 – 200 МПа

## 7.5 Коефіцієнт використання порошку

Другим важливим показником якості нанесення покриття газоплазмовим методом є коефіцієнт використання порошку (КВП), що являє собою відношення маси покриття до маси порошку, який подавався в газовий струмінь пір. Цей показник також називають ефективністю напилювання або коефіцієнтом відкладання. Він не тільки характеризує економічність процесу нанесення, але й використовується як параметр оптимізації, оскільки його максимальне значення в багатьох випадках співпадає з найкращими показниками якості покриття. Втрати порошку при газоплазмовому напилюванні, при напилюванні на неорганічну підкладку складається із втрат на відстрибування часток, які володіють недостатнім запасом теплової енергії; на розбризкування перегрітого розплаву; на випаровування матеріалу часток. В зв'язку з цим залежність КВП від електричної потужності плазмотрону носить екстремальний характер. Використовуючи модель нагрівання і руху часток в плазмовому струмені, можна оцінити зв'язок КВП з газотермічним режимом роботи плазмотрону і властивостями напиленого матеріалу на висхідній частині цієї залежності.

Для випадків нагрівання порошку в аргоновому плазмовому струмені на плазмотроні установки УМП-5-68 маємо:

$$\eta = \frac{m_n}{m_p} = \text{КВП} = \left[ 1,555 - 3,68 \cdot 10^9 \frac{V_T^3 d_q^2 D}{(IU\eta_T)^2} \right]^2 \quad (7.10)$$

Експериментально отримана залежність КВП для різноманітних матеріалів на цьому плазмотроні свідчить про задовільне співпадіння експерименту з попередньою оцінкою (рис. 7.15).

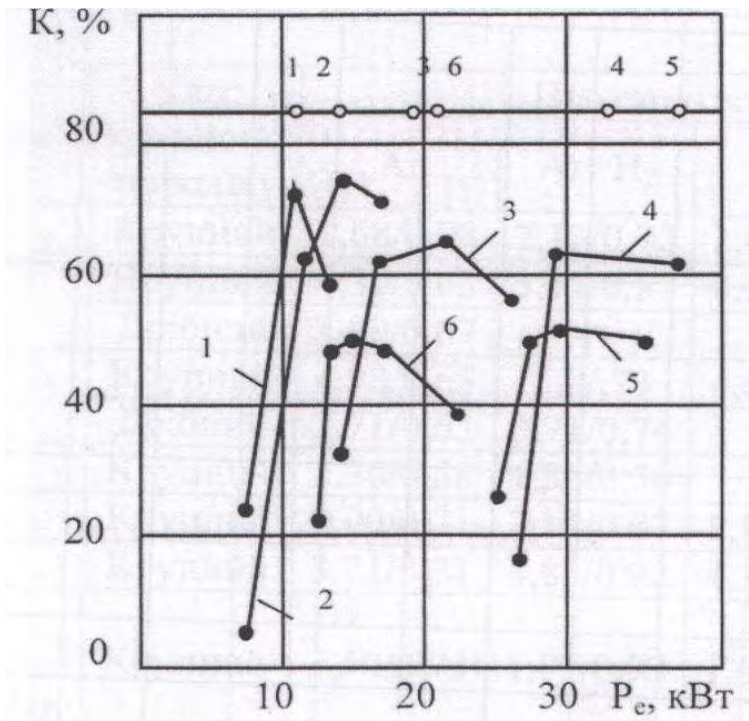


Рисунок 7.15 – Вплив електричної потужності  $P_p$  плазмотрону УМП-5 на коефіцієнт використання матеріалу  $K$ :

1 – Al; 2 – W; 3 – Cr; 4 –  $Al_2O_3$ ; 5 –  $TiB_2$ ; 6 –  $Cr_3C_2$ ; 7 розрахунковий рівень  $K_{\text{макс}}$

В табл. 7.1 наведені дані фірми «АВКО» (США) за витратою і коефіцієнтом використання порошку при газоплазмовому напилюванні з використанням різноманітних газів.

Процес плазмового розпилення доцільно проводити при мінімальних значеннях питомої електричної енергії, котра витрачається на плавлення, перегрівання і випаровування металічного матеріалу. Ентальпія часток легко регулюється зміною питомої потужності дуги  $P_p$ . Практично при напилюванні цей параметр знаходиться в широких межах і складає 2000 – 10000 кДж/кг. Зі збільшенням  $P_p$  збільшується втрати перегрітого металу на випаровування і можливе розбризкування при формуванні покриття. Але збільшення ентальпії температури часток позитивно впливає на якість газоплазмового покриття (рис. 7.16).

**Витрата порошку [кг/год] (чисельник) і коефіцієнт його використання (знаменник) при газоплазмовому напилюванні (дані фірми «АВКО»)**

Склад, % мас.)	Клас крупності порошку	Плазмоутворюючий газ			
		Ar	Ar+H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>
Алюміній	Крупний	1,68/0,78	2,13/0,72	2,08/0,70	1,90/0,64
Вольфрам	Крупний	4,30/0,63	3,53/0,51	8,56/0,64	8,79/0,65
	Дрібний	3,99/0,67	-/-	-/-	-/-
Мідь	Крупний	4,98/0,65	5,8/0,73	4,67/0,60	4,89/0,63
	Дрібний	3,71/0,63	3,71/0,74	-/-	-/-
Молібден	Крупний	2,36/0,88	1,36/0,50	7,75/0,81	8,06/0,84
Нікель	Крупний	3,90/0,71	7,11/0,87	5,57/0,68	5,25/0,64
Ніхром	Крупний	3,71/0,71	4,85/0,92	4,30/0,80	3,67/0,69
Нікелевий самофлюсуючий сплав (78%Ni+10%Cr+2,5%B)	Крупний	1,50/0,73	1,81/0,93	1,68/0,81	1,72/0,84
Нікелевий самофлюсуючий сплав (70%Ni+17%Cr+3,7%B)	Крупний	1,95/0,79	1,95/0,79	2,17/0,88	2,17/0,88
Монель-метал (69%Ni+28Si)	Крупний	5,21/0,76	4,89/0,71	5,12/0,74	3,99/0,59
Оксид алюмінію	Середній	2,49/0,60	1,90/0,57	1,90/0,57	3,08/0,94
	Дрібний	0,91/0,75	1,36/0,97	1,09/0,75	1,09/0,75
Оксид алюмінію-діоксид титану (97,5%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +2,5%TiO <sub>2</sub> )	Дрібний	1,09/0,75	0,86/0,58	0,59/0,38	0,95/0,62
Діоксид цирконію	Середній	1,0/0,55	1,27/0,54	2,27/0,62	2,67/0,59
	Дрібний	1,36/0,63	1,04/0,48	0,95/0,43	1,22/0,59
Силікат цирконію (циркон)	Середній	2,90/0,78	1,27/0,57	1,90/0,43	
Карбід вольфраму (80%W+20%Co)	Крупний	2,36/0,52	6,39/0,52	6,57/0,54	6,39/0,52
	Середній	7,47/0,75	9,01/0,65	8,06/0,58	7,84/0,57
	Дрібний	2,85/0,71	-/-	-/-	-/-
Композиційний порошок "нікель-оксид алюмінію" (20%Ni+80% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Середній	2,04/0,60	2,08/0,63	2,31/0,71	2,27/0,70
Композиційний порошок "нікель-карбід титану" (45%Ni+55%TiC)	Середній	3,22/0,72	3,17/0,76	-/-	-/-

Експериментально нами встановлено, що при газоплазмовому напилюванні мідного порошку підвищення  $P_n$  з 3000 до 8500 кДж/кг (при подачі порошку) температура напилених часток зростає з 1173 °С.

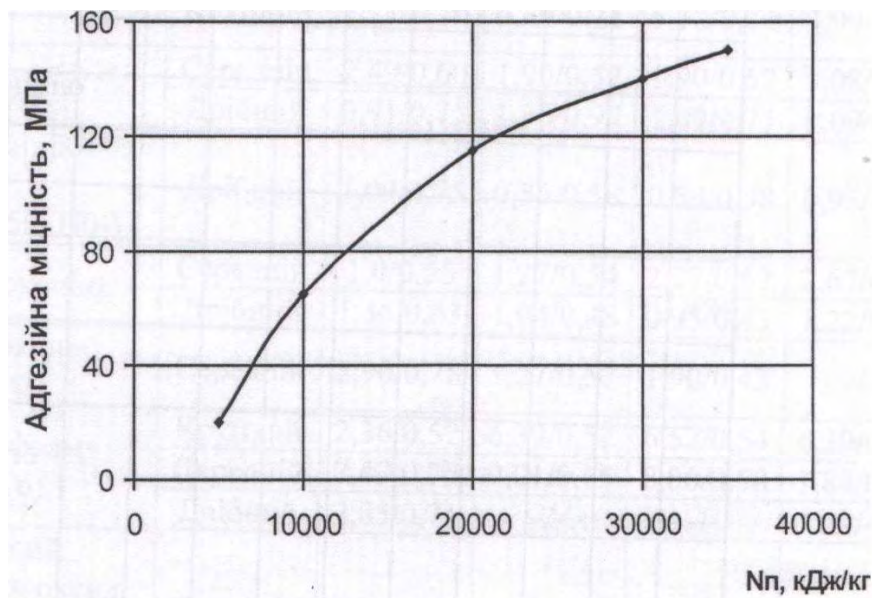


Рисунок 7.16 – Вплив питомої потужності дуги плазмотрону  $N_n$  на адгезійну міцність  $F_{зч}$

Вибрана потужність плазмотрону ( $P_n$ ) визначає як продуктивність процесу, так і ентальпію струменю часток, при цьому ефективний ККД розпилення повинен складати 0,70 – 0,85. Потужність дуги визначається значеннями струму і напруги. Напруга дуга, як правило, є не регульованим параметром. Необхідну величину потужності встановлюють безпосередньо змінюючи струм дуги. На практиці використовують потужності від 5 до 20 кВт, силу струму 80 – 600 А і напругу 18 – 35 В.

## 7.6 Пористість газоплазмового покриття

Наступною характеристикою якості плазмового покриття, що підлягає постійному контролю, є пористість. З однієї сторони, це – побічний показник умов напилювання, пористість може слугувати параметром оптимізації процесу, а з іншої – вона безпосередньо впливає на ефективність захисних властивостей покриття (стійкість відновленого контакту до зношування і корозії), його тепло- і електропровідність, механічні та інші властивості.

Загальноприйнятою методикою визначення пористості є методика гідростатичного зважування (ГОСТ 18898-93). Але при цій методиці особливості структури напилених покриттів, а також малі розміри зразків

призводять до великої похибки (до 80 % і більше). В зв'язку з цим використовують модифікований варіант гідростатичного зважування, котрий забезпечує зниження помилки з 25 – 150 % до 5 – 20 %. Підвищення точності вимірювання досягається головним чином за рахунок застосування підвішування проводу діаметром 0,03 – 0,1 мм (мідної або платинової) і численним зважуванням зразка, що насичений рідиною, через деякі інтервали часу (15 – 30 с).

## **7.7 Дослідження фізико-хімічних процесів руху і нагрівання часток в потоці плазми**

Цілий комплекс явищ, що мають місце на шляху руху частки порошку від моменту входження в контакт з плазмовим струменем до моменту їх дотику до підкладки, може бути розбитий на наступні чотири основні групи:

а) газодинамічні процеси, що викликають прискорення і гальмування руху частки і визначають час її перебування в різноманітних зонах, а також запас кінетичної енергії в момент зустрічі з підкладкою;

б) процеси теплообміну, що супроводжуються фазовими перетвореннями (плавлення, випаровування), в результаті яких частка до моменту участі її у формуванні покриття набуває визначений запас теплової енергії;

в) процеси зміни хімічного складу вихідного напиленого матеріалу внаслідок термічного розкладання, взаємодії поверхні частки з елементами оточуючого середовища (киснем, азотом тощо), а також взаємодії в об'ємі частки у випадку напилювання гетерогенних порошкових матеріалів;

г) морфологічні зміни в напиленому порошковому матеріалі внаслідок явищ шарування при плавленні, зіткненні і руйнуванні часток в запиленому газовому потоці.

Відомості про значення теплової і кінетичної енергії частки, її розміри, форму і хімічний склад є необхідними при аналізі процесів формування покриття. Для обґрунтування вибору тих чи інших загальних закономірностей і математичних залежностей, що отримані в теорії двофазних потоків, необхідно складання характеристики плазмового струменю з точки зору умов протікання газу і його взаємодії з дисперсною складовою. Перш за все, це відноситься до значення числа Рейнольдса ( $Re$ ). Розрахункова оцінка показала, що для різноманітних умов напилювання величина  $Re$  знаходиться в межах 0,5 – 22 (ламінальний режим протікання газу).



Тепер, що стосується теплофізичних характеристик, то тут найбільшу цікавість являє критерій Біо (Bi). Розрахункові значення свідчать про широкий діапазон його можливих змін в залежності від роду напиленого матеріалу і складу плазмоутворюючого газу (0,001 – 5,5), тобто про нагрівання частки як при відсутності температурного градієнту, так і при суттєвому перепаді температур між її поверхнею і центром.

Другим теплофізичним критерієм, що характеризує умови теплообміну, є критерій Фур'є. Він визначає час переходу процесу теплообміну в квазістаціонарний стан, вирівнювання температури по перерізу частки.

Виходячи з положення, що частка порошку взаємодіє з неізотермічним затопленим струменем плазми, яка володіє радіальним і осьовим градієнтами температури і швидкостей можна оцінити сили, що взаємодіють на неї в цих умовах [25, 39]:

- силу аеродинамічного опору;
- силу, що обумовлена градієнтом тиску в потоці;
- силу прискорення часток шару газу, який прилягає до поверхні (приєднаної маси);
- силу, яка обумовлена нестационарністю процесу і залежить від характеру руху частки за попередній період (сила Басе);
- силу, що обумовлена інерцією об'єму газу, який витіснила частка;
- силу земного тяжіння частки;
- силу термофорезу, що обумовлюється наявністю температурного градієнту в потоці;
- силу, яка обумовлена обертанням частки внаслідок градієнту швидкості обтічного потоку (сила Магнуса).

Розрахункова оцінка величини цих сил показує, що якщо перша з них складає  $50 \times 10^{-3}$  Н, то сили Басе і Магнуса знаходяться приблизно на рівні  $3 \cdot 10^{-3}$  Н і  $2 \cdot 10^{-3}$  Н відповідно, а інші –  $10^{-3}$  –  $10^{-5}$  Н [12].

Нагрівання часток в плазмовому струмені при значенні критерію Кнудсена  $K_n < 1$  в основному визначається конвективним теплообміном і оцінюється за критерієм Нусельта (Nu). В більшості випадків вважають, що теплопровідність часток і їх розміри такі, що тепловідвід з поверхні всередину частки і її теплообміні з газом не відіграє суттєвого значення ( $Bi < 0,1$ ). Радіальний розподіл швидкостей і температури газу і часток в плазмовому струмені може бути описаний профілями Шліхтинга. Режим протікання газу поблизу поверхні частки в ряді випадків може відповідати протіканню із ковзанням.

При формуванні плазмового покриття окрім напиленого матеріалу приймає участь і безпосередньо основа (матеріал контактотримача апарата), а отже, до кількості факторів, що впливають на цей процес, входять:

- склад матеріалу основи з його теплофізичними і фізико-хімічними характеристиками;
- стан поверхні основи (наявність різного роду плівок, ступінь шорсткості, нагрівання тощо);
- термічна дія на основу газового струменю.

Таким чином, етап формування покриття являє собою складний комплекс різного роду явищ що впливають на отримання покриття з бажаним рівнем властивостей.

Феноменологічний аналіз явищ, що протікають на стадії відновлення контактів комутаційних апаратів, дозволяють виділити як основні наступні [25, 39]: удар частки по поверхні; деформацію частки; термічні процеси в зоні контакту; виникнення сил зчеплення частки з контактною поверхнею; встановлення термічної рівноваги системи покриття – основа з оточуючим середовищем і формування залишкової напруги. Ці явища не розділені в часі і загалом накладаються одне на одне.

Прослідкуємо за розвитком контактних процесів при ударі та затвердінні часток покриття на основі, температура якої послідовно підвищується. Ці експерименти нами були виконані для модельного металу – срібла. Срібло не дуже окислюється під час проведення дослідів і, крім того внаслідок високої пластичності срібла, осередки захвату мають чітко виражений рельєф після відділення часток від основи по межі контакту. Це гарно видно на рис. 7.17 де на поверхні основи під часткою, що приварилася, а потім механічно видаленої, гарно простежується рельєф поверхні. На початку взаємодії частки з основою в їх контактні утворюються осередки захвату. Після відривання часток від основи на поверхні в осередках захвату залишаються сліди металу, який був вирваний з часток (світлі виступи – осередки захвату). На металах розміри осередків захвату, що спостерігали за допомогою растрового скануючого мікроскопу, складають 200 – 700 нм. По мірі розвитку реакції кількість осередків збільшується і при міцності зчеплення, що близька до максимальної, вони практично зливаються, заповнюючи всю центральну область  $D_x$  деформованої частки. Діаметр плями хімічної взаємодії  $D_x$  звичайно дещо більше діаметра напиленої частки  $D_x \approx D$ . Рівність діаметрів пояснюється тим, що на площі діаметром сі інтенсивно діє тиск при ударі та деформації частки. Ближче до краю частки тиск знижується і краї приварюються гірше. Однак, при сильному

нагріванні основи або перегріванні частки температура, мабуть, компенсує недолік тиску і частки приварюються повністю  $D_x \approx D$  по всьому діаметру  $D$ .

Накладаючись одна на одну, частки утворюють шар покриття. Якщо когезія часток вища, ніж їх адгезія, то при відриванні покриття руйнування відбувається між основою і часткою. На рис. 7.17 а спостерігається слід відривання невеликої частки (нижня ліва частина), яку відірвала та забрала з собою більша частка, що її накривала.

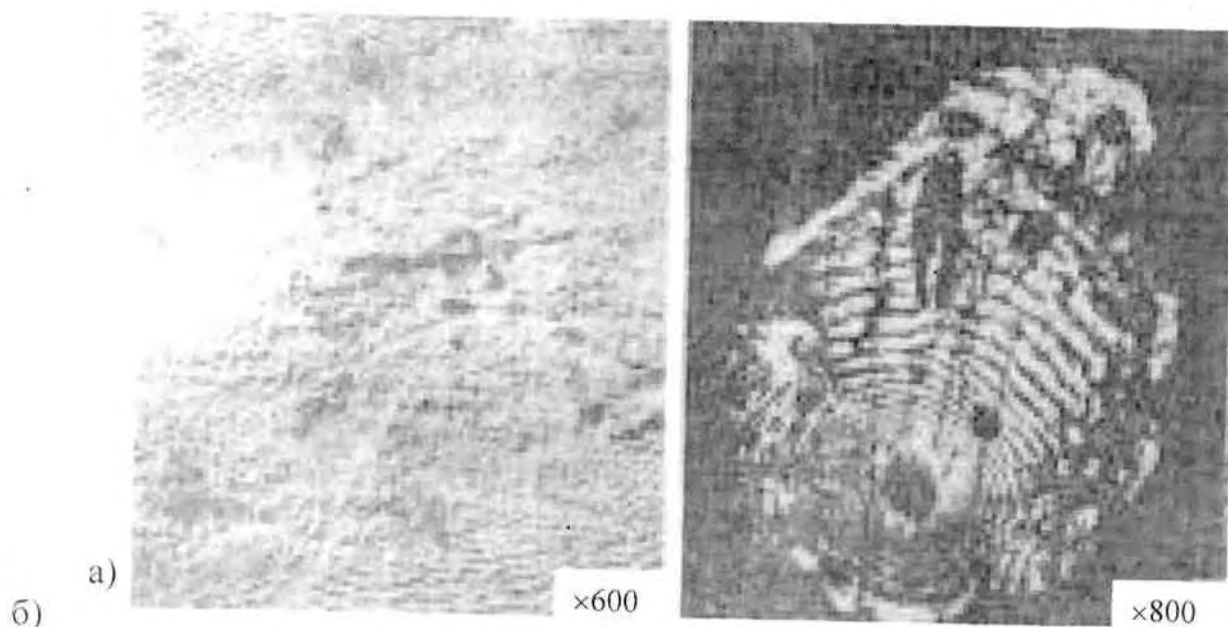


Рисунок 7.17 – Фрактографія поверхні основи (матеріал SrM-0,2) під привареною срібною часткою:

а – утворення шару покриття: велика частка накрила меншу за розміром і відірвала її від основи; б – вид контактної поверхні частки, що відірвана від основи

Аналіз процесів, що відбуваються при ударі і деформації частки, дозволив зробити принципово важливий висновок – можливість взаємного термічного впливу часток при газоплазмовому напилюванні досить мала і імовірність попадання нової розплавленої частки на ще не загуслу, що напилена раніше, може не братися до уваги. Це суттєво полегшує аналіз процесу утворення покриття, зводячи його до дослідження контактної взаємодії окремих часток.

Більшість дослідників віддають зараз перевагу гіпотезі утворення сил зчеплення при напилюванні переважно за рахунок міжатомних зв'язків, признаючи в той же час наявність і елементів механічного зачеплення і міжмолекулярної взаємодії, тобто взаємодія в цьому випадку носить комплексний характер з одночасною реалізацією деяких механізмів зчеплення покриття з основою.

Згідно сучасних положень, увесь процес взаємодії частки з напиленою поверхнею можна представити складеним з трьох стадій: утворення фізичного контакту; активація контактних поверхонь та утворення хімічних міжатомних зв'язків на межі розділу; розвиток об'ємної взаємодії (релаксація мікронапруги, рекристалізація, гетеродифузія, утворення нових фаз).

Для забезпечення механічного зчеплення і виникнення сил типу Ван-дер-Ваальсових достатньо наявності першої стадії. Процес з'днання на другій та третій стадіях визначається трьома основними параметрами – температурою в контакті, тривалістю процесу і величиною прикладеного тиску.

У всіх випадках важливим моментом є деформація і розтікання часток, що забезпечує фізичний контакт напиленої частки з поверхнею. Ступінь деформації частки і досконалість утвореного контакту з напиленою поверхнею залежить від великої кількості факторів: теплової і кінетичної енергії часток, властивостей матеріалу розплаву (в'язкості, теплоємності, теплопровідності, поверхневого натягу тощо), стану напиленої поверхні тощо.

Термодинамічна імовірність здійснення хімічної взаємодії характеризується зменшенням вільної енергії системи, а кінетика – енергетичним бар'єром, котрий необхідно подолати атомам для переходу з одного стійкого стану в інший (енергією активації взаємодії).

Найбільш повільною, на нашу думку, і, мабуть, обмежуючою стадією при напилюванні є активація поверхні основи. Стадія утворення фізичного контакту в результаті деформації і розтікання частки, а також наступні за активацією процеси перерозподілення електронної густини і викликане ними перегрупування атомів (власне хімічна взаємодія) протікають набагато швидше.

При газоплазмовому напилюванні в стадії активації поверхні основи в свою чергу виділяють три фази:

1) локальне зниження активаційного енергетичного бар'єру поверхні основи під дією тиску від удару частки внаслідок пружних викривлень решітки і пластичної деформації;

2) перехід в активований стан групи атомів в цій локальній області за рахунок внутрішньої енергії коливання атомів в твердому тілі, тобто термічна активація;

3) розпад активованого комплексу, в результаті чого в залежності від напруженого стану утворюється нове атомне угруповання (осередок взаємодії) або вихідні поверхневі зв'язки.

В граничному випадку активований стан являє собою дисоціацію або розрив зв'язків, поверхневих атомів, тобто процес руйнування. На цій основі

робиться висновок про єдину природу руйнування і з'єднання твердих матеріалів. Внаслідок термомеханічного характеру процесу руйнування в загальному випадку активація матеріалу основи також носить термомеханічний характер.

Розвиток реакції на межі взаємодії фаз, тобто плями контакту, можна приблизно визначити за відносною міцністю зчеплення [92]:

$$\frac{\sigma(\tau)}{\sigma_m} = \frac{N(\tau)}{N_0} \quad (7.11)$$

де  $\sigma(\tau)$  – міцність, що досягається за час  $\tau$ ;  $\sigma_m$  – максимальна міцність, яку можна отримати при завершенні процесу;  $N_0$  – кількість атомів на поверхні основи або частки, що знаходиться у фізичному контакті;  $N(\tau)$  – кількість атомів із кількості  $N_0$ , що прореагували за час  $\tau$ .

Кінетика такої взаємодії загалом описується виразом [92]:

$$\frac{dN}{d\tau} = \nu_D (N_0 - N) \exp\left(-\frac{E_a}{kT_k}\right) \exp(S/k) \quad (7.12)$$

де  $\nu_D$  – частота власних коливань атомів;  $T_k$  – температура в зоні взаємодії;  $k$  – стала Больцмана;  $E_a$  – ефективна (уявна) енергія активації процесу;  $S$  – коливальна і конфігураційна ентропія активації процесу в зоні хімічної взаємодії. Внаслідок малої величини  $S$ :  $\exp(S/k) \approx 1$ .

Вираз (4.2) якісно правильно відображає процеси хімічної взаємодії при напилюванні, але має ряд суттєвих недоліків для її кількісної оцінки. Основним з них є невизначеність ефективної енергії активації  $E_a$ , яка обумовлена її залежністю від тиску, швидкості деформації, стану поверхні основи, часу взаємодії тощо.

Залишається спірним питання про роль пластичної деформації основи в кінетиці хімічної взаємодії матеріалів при газоплазмового напилюванні. Вважається, що пластична деформація не може бути головним механізмом її активації при плазмовому напилюванні з швидкостями часток нижче 60 м/с. Підтвердженням є той факт, що в лунці, яка утворена на поверхні основи шляхом її пластичної деформації при ударі напиленої частки, не всю поверхню вступає у взаємодію, а лише її локальні ділянки. Крім того, розрахункові оцінки і експериментальні виміри густини дислокацій, що генеровані в поверхневому шарі матеріалу основи при напилюванні, показують, що пластична деформація може призвести до активації не більше 0,1 частини поверхні контакту.

Аналіз сучасних думок про взаємодію напилених часток з основою дозволяє зробити наступні висновки:

1. Хімічна взаємодія між напиленими частками і основою в значній мірі визначає міцність зчеплення газоплазмових покриттів. Кінетика такої реакції лімітується стадією активації поверхні основи. Але відсутні ясні свідчення про головні механізми активації в конкретних умовах напилювання, перш за все, при підвищених швидкостях часток і дефектах поверхні основи.

2. Існуючі відомості про міцність зчеплення газоплазмових покриттів недостатньо повно відображають основні закономірності процесу утворення з'єднання матеріалів при напилюванні, до речі, дискретність хімічної взаємодії, активуючий вплив попередньої обробки основи, роль оточуючого газового середовища тощо.

3. Не існує кількісних оцінок впливу стану поверхні основи – дислокаційної структури, напруги, наявності плівок тощо – на міцність зчеплення покриттів.

Поєднання поглибленого теоретичного аналізу всіх різноманітних явищ, що відбуваються при плазмовому напилюванні покриттів контакт-деталей, з методами регресивного аналізу являє собою, на нашу думку, найбільш доцільний шлях вивчення цих процесів.

## 8. УСТАНОВКИ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ НА ЗНОШЕНІ ДЕТАЛІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

### 8.1 Технічні характеристики установок для детаноційно-газового напилення на зношені деталі електрообладнання

Основними технологічними параметрами плазмового способу напилювання являються: склад порошкового матеріалу; потужність дуги; витрата плазмо утворюючого газу; витрати газу на подачу порошку; розмір його часток; кут зустрічі потоку часток з поверхнею напилювання; дистанція напилювання; швидкість переміщення плями напилювання.

Установка для плазмового або дугового напилювання складається з джерела живлення, механізму подачі розпиленого матеріалу, системи подачі газу, пульта керування і розпилювачу (плазмотрону).

При плазмовому напилюванні дуговий розряд збуджується і горить в замкненому об'ємі між електродами, які не розплавляються, при інтенсивному охолодженні стовбуру потоком плазموутворюючого газу. Створюються сприятливі умови для стискання дуги. Статистична вольт-амперна характеристика її, як правило, знаходиться на зростаючій вітці залежності  $U=f(I)$  (рис. 8.1, ділянка 1).

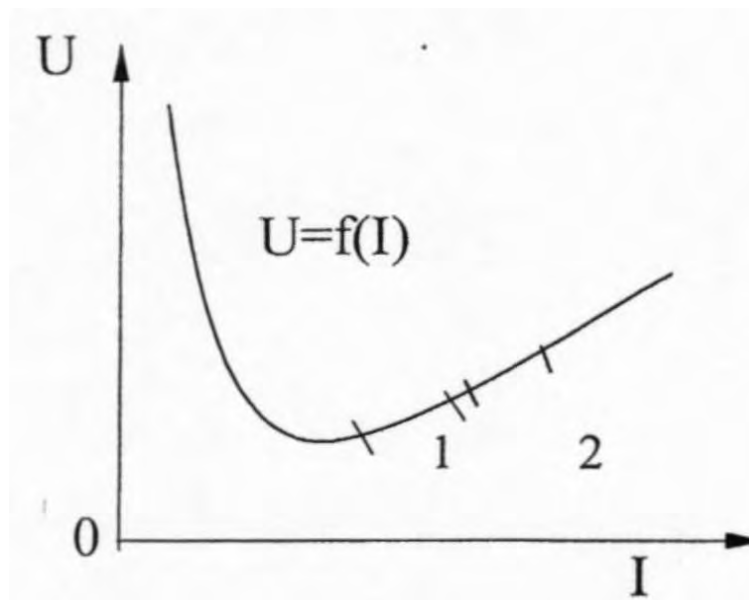


Рисунок 8.1 – Статична вольт-амперна характеристика дуги при різній густині струму:

1 – ділянка, котра характерна для дуги, що горить в плазмотроні; 2 – те ж саме при дуговій металізації

Напруга для запалювання дуги (холостий хід) в залежності від умов газоплазмового напилювання складає 40 – 90 В. Невисокі значення  $U_0$  необхідні при роботі з аргонем (40 – 60 В), значно більш високі - при використанні азоту (80 – 90 В) і аргано-водневої суміші (60 – 70 В).

Для реалізації великої потужності дуги, що необхідна для плазмоутворення, вимагаються більші значення струму. Виходячи з цього, джерела живлення для газоплазмового напилювання повинні бути високоамперні з широким діапазоном регулювання струму (100 – 1000 А).

Умови горіння дуги в плазмотронах досить стабільні. Довжина дуги і витрата плазмоутворюючого газу змінюються незначно. Завдяки цьому відпадає необхідність у високих динамічних властивостях джерела, під якими в першу чергу, розуміють швидкість зміни струму і напруги при зміні довжини дуги, складу і витрати плазмоутворюючого газу.

При дуговій металізації дуга збуджується і горить між електродами, які розплавляються. На стовбур дуги безперервно діє потік стисненого газу, котрий визначає циклічність її горіння. Аналіз знятих нами осцилограм, дозволяє виділити дві досить виражені полоси частот при живленні дуги постійним струмом. Низькочастотні коливання складають 250 – 2500 Гц, високочастотні –  $(50 – 100) \cdot 10^3$  Гц. Статична вольт-амперна характеристика дуги (інтегральна робоча характеристика) розміщена також на зростаючій вітці залежності  $U=f(I)$  (рис.6.1, ділянка 2).

Для запалювання дуги необхідна порівняно невисока напруга, яку можна прийняти як наближену до напруги горіння дуги. На практиці горіння дуги відбувається при нарузі 20 – 40 В. Отже, для дугової металізації потрібні джерела з невисокою напругою холостого ходу ( $U_0 = 30 – 40$  В).

Продуктивність при напилюванні залежить, головним чином, від сили струму дуги. Тому, необхідні високоамперні джерела живлення з величиною струму  $I = 300 – 1000$  А і плавним його регулюванням в широкому діапазоні.

Циклічність горіння дуги вимагає джерел живлення з високими динамічними властивостями. Наприклад, швидкість підвищення напруги  $dU/dt$  за цикл повинна бути максимальною. Швидкість підвищення струму  $dI/dt$  також повинна бути високою (природно 500 – 1200 кА/с).

Стабільність процесу при електродуговій металізації в загальному визначається саморегулюванням дуги. Принцип саморегулювання полягає в тому, що швидкість плавлення електродів змінюється при зміні довжини дуги. З цим пов'язана зміна струму. Так, при збільшенні довжини дуги струм зменшується. При цьому зменшується швидкість плавлення проводу. При



постійній швидкості її подачі довжина дуги відновлюється. Навпаки, зменшення довжини дуги призводить до зростання струму і швидкості плавлення, відповідно збільшується і довжина дуги.

Для живлення дуги при плазмовому і дуговому напилюванні використовуються наплавочні (зварювальні) перетворювачі та напівпровідникові випрямлячі. У відповідності до рекомендацій [15, 48] для живлення дуги в плазмових розпилювачах доцільно застосовувати джерела з крутоспадаючою зовнішньою характеристикою. В цьому випадку при коливаннях напруги дуги величина зміни струму буде змінюватися незначно (рис. 8.2 а). Інші зовнішні характеристики джерела спричиняють великі коливання струму (рис. 8.2 б).

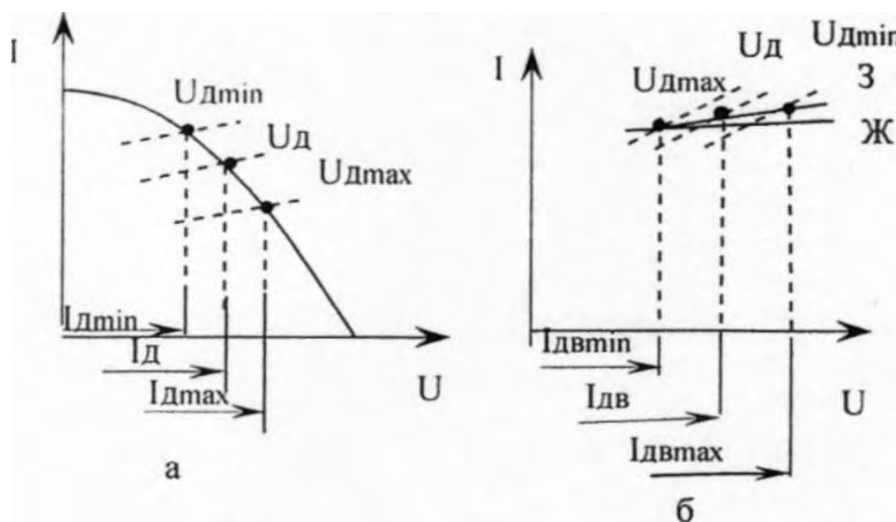
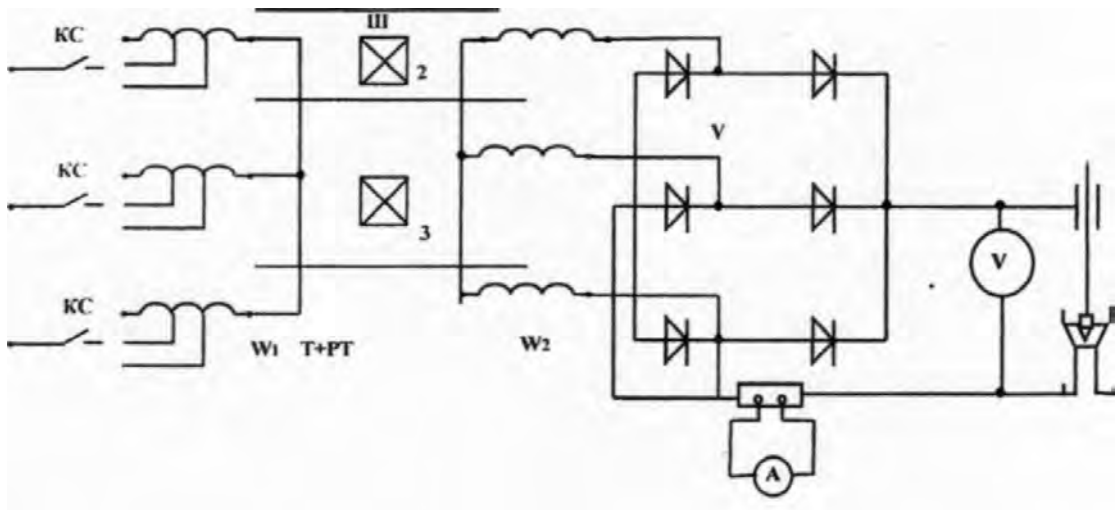


Рисунок 8.2 – Коливання струму при зміні напруги і довжини дуги:

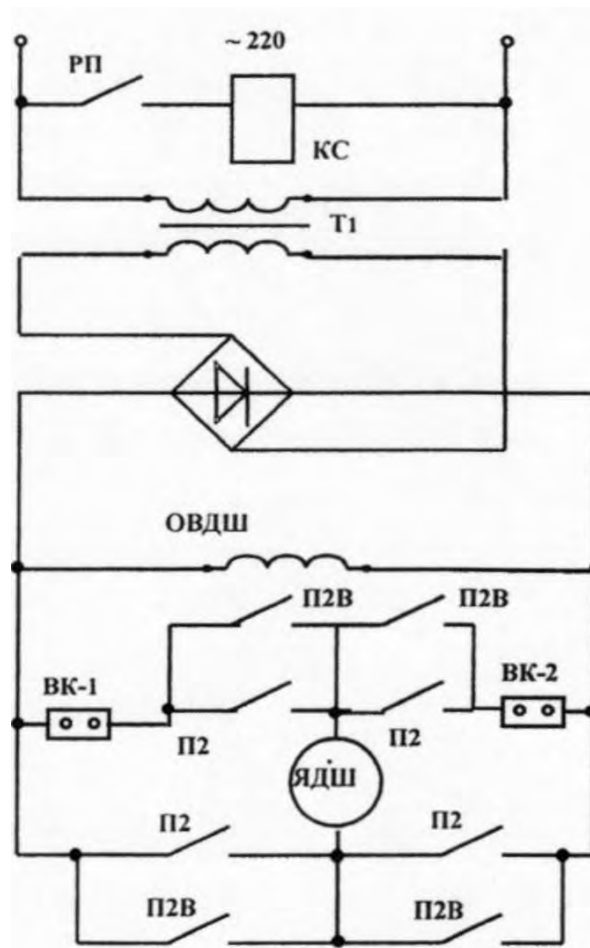
- а – крутоспадаюча зовнішня характеристика джерела живлення;
- б – жорстка (Ж) і зростаюча (З) зовнішні характеристики джерела живлення

Для живлення дуги при електродуговій металізації необхідно джерела з жорсткими і зростаючими ВАХ. Коливання довжини дуги супроводжується різкими змінами струму (рис. 8.2 б). Це позитивно впливає на саморегуляцію дуги і стабільність процесу напилювання.

В країнах СНД як джерело живлення для плазмового напилювання нами був прийнятий випробуваний випрямляч з трансформаторним регулятором струму ИПН-160/600 (рис. 8.3 а). Трансформатор  $T$  підключають до мережі через силовий контактор КС Первинна обмотка трансформатора  $W_1$  секційна.



а



б

Рисунок 8.3 – Електрична силова схема ИПН-160/600 (а) і схема кола керування (б).

Це дозволяє ступінчато встановлювати потрібні значення напруги холостого ходу (наприклад, у випадку застосування різноманітних плазмоутворюючих газів). Напруга із вторинної обмотки подається на діодний

випрямляючий блок  $V$ , який зібраний за трифазною мостовою схемою із водоохолоджуючих кремневих вентилів ВВ-500. У вікнах магнітопроводу розміщений рухомий шунт (Ш). Для його переміщення передбачений механізм з електроприводом постійного струму (рис. 6.3 б). Двигун шунта, як і інші кола керування джерелом, живиться від окремої схеми напругою 220 В. Якір двигуна шунта ЯДШ і його обмотка збудження ОВДШ живляться від знижувального трансформатора ( $T_1$ ) через однофазний випрямляч. Напрямок руху шунта (реверс) встановлюється тумблерами П2 і П2В. В схемі передбачені вимикачі ВК1 і ВК2. Керування джерелом здійснюється за допомогою кнопок завдяки проміжним реле РП.

Перевагами джерела живлення ИПН-160/600 є простота конструкції, надійність, довговічність, невисока вартість. В експлуатації він легко монтується та ремонтується. Недоліком джерела є відсутність системи автоматичного регулювання заданих параметрів режиму горіння дуги ИПН-160/600 відноситься до першого покоління спеціалізованих джерел для газоплазмового напилювання.

Зараз замість ИПН-160/600 все частіше застосовується тиристорний випрямляч ВПН-160/630, який відзначається повітряним охолодженням, вмонтованим осцилятором для підпалювання дуги, двоступеневим регулюванням напруги холостого ходу та струму.

При дуговій металізації, з урахуванням раніше сформульованих вимог, дозволяється застосовувати джерела живлення, що призначені для механізованої дугової наплавки (зварювання) в середовищі захисних газів електродами, що плавляться. Вони, як відомо, мають невисокі напруги холостого ходу, пологоспадаючі або жорсткі характеристики та мають високі динамічні характеристики. Найбільш доцільно використовувати джерела випрямленого струму. Також можна застосовувати і зварювальні перетворювачі, наприклад ПСГ-350, ПСГ-500.

Поряд з джерелом живлення самостійну функцію виконує блок, що об'єднує елементи механізму подачі розпиленого матеріалу. Зупиняючись на технології напилювання з використанням проводу, стержнів, необхідно зауважити, що в даному випадку велику роль відіграють рівномірність подачі та фіксоване положення їх розплавленого кінця. Тому, в механізмах подачі передбачені пристрої для направлення проводу. Механізм розміщують або в одному корпусі з розпилювачем або окремо. В першому випадку використовують тягучий принцип подачі проводу, в іншому – штовхаючий у направляючих каналах. Для роботи механізму подачі використовують пневмо-

або електропривод. Пневмопривід застосовують тільки для ручних апаратів, де розпилення проводу відбувається за допомогою стисненого повітря. До пневмоприводу вмонтовують малогабаритну турбінку або ротаційний двигун.

На відміну від пневмоприводів електроприводи значно простіші при виготовленні. Їх використовують як комплектуючі вироби з можливістю легкої заміни. Стационарні установки для напилювання містять в механізмах подачі проводу тільки електропривод. По гнучким шлангам (направляючим каналам) дріт подається від механізму подачі до розпилювачів. При цьому відстань між ними може досягати 3 м і більше. При подачі тонкого проводу доцільно використовувати механізми тягнучого типу, закріплюючи їх безпосередньо на розпилювачі. Товстий дріт подають механізмами штовхаючого типу, відділяючи його від розпилювача.

В електроприводах в основному застосовують двигуни постійного струму. При цьому використовують нерегулюючий редуктор або регулюючий з невеликою кількістю ступенів. Швидкість подачі проводу регулюємо, змінюючи напругу на обмотці якоря двигуна. Для цього застосовуємо автотрансформаторні та тиристорні регулятори напруги (РН).

На рис. 8.4 показана схема керування двигуном постійного струму з автотрансформаторним регулятором напруги. Елементи електроприводу живляться від знижувального трансформатора Т.

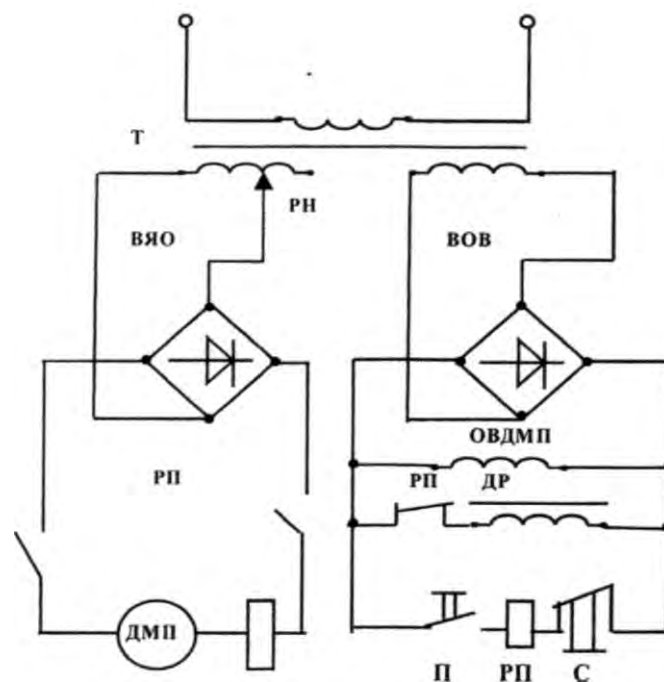


Рисунок 8.4 – Схема електроприводу

Від випрямляча обмотки якоря ВЯО напруга через реле РП подається на обмотку якоря двигуна механізму подачі ДМП. Він регулюється регулятором

напруги РН. Живлення обмотки збудження ОВДМП відбувається від випрямляча ВОВ. Від нього живляться допоміжні елементи: котушки реле РП дроселю ДР, кнопки “Пуск“ (П) і “Стоп“ (С). Подача проводу починається натисканням кнопки “Пуск“. Широкого розповсюдження в електроприводах набули схеми з регулятором напруги тиристорного типу. Використовуючи фазоперетворюючі та інші способи, регулюємо напругу, яка подається на ДМП. В іншому робота схеми аналогічна раніше розглянутій.

При газоплазмовому напилюванні газу виконують ряд функцій: розпилення і прискорення напилених часток, джерело теплоти у поєднанні з розпиленням і прискоренням, транспортування порошку в зону нагрівання і прискорення тощо. Живлення газом відбувається від компресорних станцій (установок), заводських газових магістралей, балонних рамп і окремих балонів. Джерело живлення газом вибирають в залежності від об’ємів напилювання. В установках для газоплазмового напилювання є блок живлення газом і газорозподільний пульт з апаратурою контролю і керування.

Найпростіша схема живлення газом при подачі в зону нагрівання розпилюючого апарату стисненого газу, котрий виконує тільки функції розпилення (рис. 8.5 а), характерна для дугової металізації. Від спеціального компресора або заводської мережі повітря подаємо в ресивер, який забезпечує згладжування пульсацій повітряного потоку при розпиленні провідникових електродів. З ресивера стиснене повітря направляється в газову магістраль, яка складається із запірної вентиля 1, регулюючого газового редуктора 2, ротаметра 3 і масловодовідділювача 4, а потім – до розпилювачу.

Більш складні схеми живлення, коли газу виконують декілька функцій, наприклад, перетворення електричної енергії в теплову у вигляді плазмового струменю, подача порошку, а інколи і захист процесу напилювання. На рис. 8.5 б наведена схема живлення газом з подачею плазмоутворюючого і транспортуючого газів. Стиснені газу від рамп або одинарних балонів подаємо до розпилювачу через запірні-регулюючі вентиля 1 і вимірювальні ротаметри 3. Тиск газів контролюється манометром 5. Специфічним елементом є рампа, в якій об’єднані балони зі стисненим газом. Балони з однаковим газом підключені до загального трубопроводу. В газову магістраль стиснений газ надходить через рамповий редуктор. Для газоплазмового напилювання, як правило, використовуємо стиснені газу (аргон, азот, водень тощо), що постачаються в балонах об’ємом 40 л під тиском до 20 МПа (ГОСТ 949-73).

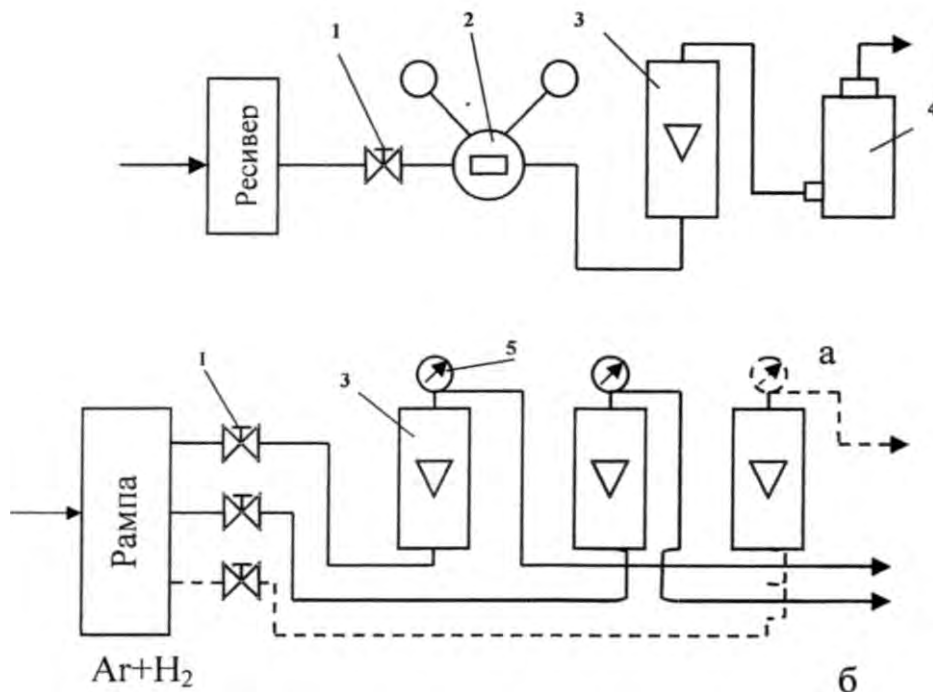


Рисунок 6.5 – Схеми подачі розпилюючих газів:

а – стисненого повітря; б – плазموутворюючого і транспортуючого газів

Зі збільшенням потужності дуги інтенсивно збільшуються температура і ентальпія плазмового потоку як на зрізі сопла, так і в інших її перерізах. Потужність дуги визначається напругою та силою струму. Напруга залежить від довжини дуги, що в свою чергу визначається конструкцією розпилювача, видом та витратою плазموутворюючого газу. При реалізації заданої потужності дуги необхідно вибрати режим роботи з максимальною напругою. Залежність продуктивності напилювання порошків самофлюсуючих сплавів від потужності дуги наведена на рис. 8.6.

При витраті плазموутворюючого газу вище оптимальних значень суттєво знижується густина покриття, зменшуються коефіцієнт витрати порошку та інші показники ефективності напилювання. Із збільшенням витрати плазموутворюючого газу підвищується розпилювальна здатність плазмового струменю, її швидкість і відповідно швидкість напилених часток, температура яких знижується. При розпиленні проводу збільшення витрати плазموутворюючого газу сприяє утворенню більш дисперсного потоку матеріалу, що наноситься на контакт-деталь. При газоплазмовому напилюванні об'ємні витрати плазموутворюючого газу складають 2,0 – 4,0 м<sup>3</sup>/год, масові – 1,8 – 7,2 кг/год.

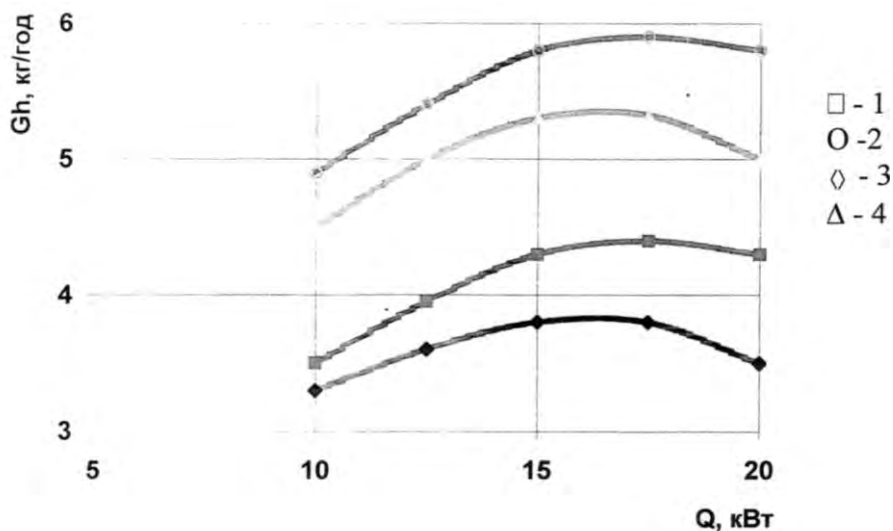


Рисунок 8.6 – Залежність продуктивності процесу напилювання від потужності дуги плазмотрону:

1 –  $d = 160 - 200$  мкм, витрата плазмоутворюючого газу  $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  
 2 –  $d = 160 - 200$  мкм, витрата газу  $0,0012 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 3 –  $d = 250 - 300$  мкм, витрата газу  $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  
 4 –  $d = 160 - 200$  мкм, витрата плазмоутворюючого газу  $0,0012 \text{ м}^3/\text{с}$

Великий вплив на теплофізичні характеристики плазмового струменя в умовах теплообміну порошкового напилювання спричинює вид газу. Не дивлячись на високу температуру, аргонний струмінь слабо розігріває порошкові частки. Це обумовлено малою величиною критерію Біо та скороченою високотемпературною зоною плазмового струменя. Великий ступінь прогріву напилених часток досягається при використанні азоту і водневмісних газів. При додаванні водню до аргону та азоту можна одержати плазмовий струмінь, у якому інтенсифікується теплообмін між порошком і плазмою. Крім того, зона нагрівання водневмісних струменів є досить протяжною. Збільшується час нагрівання напилених часток і відповідно їх ентальпія.

Витрата газу на подачу порошку складає близько 10 % витрати плазмоутворюючого газу. Зростання витрати транспортуючого газу полегшує і стабілізує подачу порошку. Разом з тим спостерігаємо зміщення потоку часток щодо плазмового струменя. При цьому дуже знижується температура, зменшується швидкість руху часток і коефіцієнт використання порошкового матеріалу.

Швидкість подачі порошку звичайно оцінюємо за його витратою, вона складає  $0,9 - 7,2$  кг/год. Підвищена кількість порошку, який подаємо до плазмового струменя, зменшує теплову енергію для нагрівання напиленої

частки. При цьому знижується ефективність процесу. Для подачі порошку використовують гази, аналогічні плазмо утворюючим. Можна використовувати й інші гази з різними фізико-хімічними властивостями.

Для плазмового напилювання застосовуємо порошок із середнім діаметром часток 10 – 200 мкм. Зі збільшенням їх розміру виникають труднощі при нагріванні до температури плавлення.

Особливо складно проплавляти великі частки тугоплавких матеріалів з низькою теплопровідністю або малою густиною, наприклад оксидів цирконію, магнію, карбїду титана. У результаті погіршуються показники процесу напилювання. Однак, напилювання крупних фракцій дозволяє знизити вміст легуючих елементів при нанесенні покриття. Це підтверджено експериментальними дослідженнями. Отримані дані представлені в табл. 8.1.

Для газоплазмового напилювання оптимальна дистанція дорівнює 50 – 300 мм. Надмірно малі дистанції напилювання, що близькі до довжини початкової ділянки плазмового струменя, не завжди забезпечують прогрівання порошкових часток і необхідну швидкість їх руху. Разом з тим зростає небезпека неприпустимого нагрівання контакту.

Таблиця 8.1

**Зміна вмісту легуючих елементів вихідного складу порошку при напилюванні покриття**

Діаметр напилених часток, мкм	Вміст В			Вміст Si		
	до напилювання	після напилювання	чад	до напилювання	після напилювання	чад
100 – 160	2,80	2,49	11,1	3,85	3,46	10,1
200 – 250	2,80	2,53	9,6	3,85	3,53	8,3
250 – 300	2,80	2,57	8,2	3,85	3,62	5,6

Зі збільшенням дистанції різко знижуються температура і швидкість плазмового струменя на основній ділянці (рис. 8.7). Спостерігається зниження температури і швидкості напилених часток. Найбільші дистанції напилювання вибирають при використанні ламінарної плазми або в тому випадку, коли процес протікає в низькому вакуумі. Істотно зростає дистанція напилювання зі збільшенням потужності дуги при використанні газів з високою ентальпією.



T, K

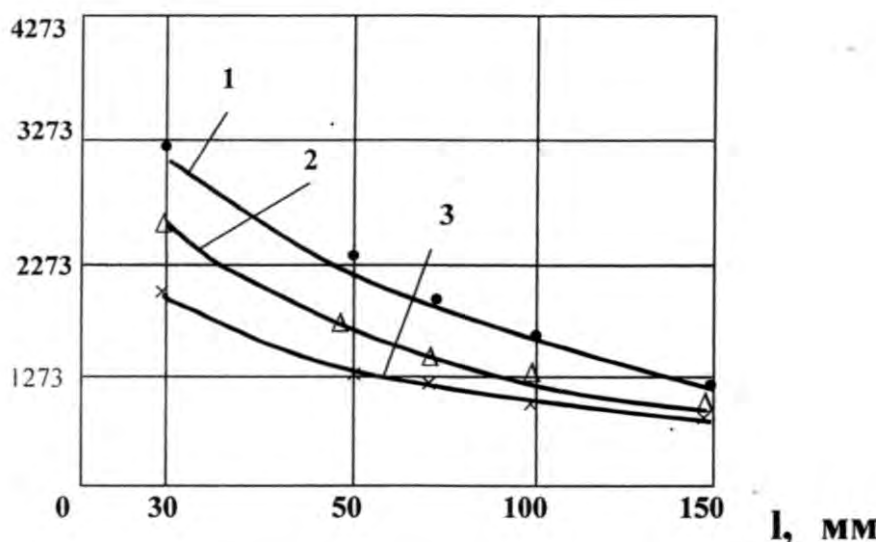


Рисунок 8.7 – Криві розподілення температури плазмового струменю від дистанції напилювання:

1 – сила струму дуги 500 А; 2 – сила струму 455 А; 3 – сила струму 300 А (робочий газ – аргон, 1,8 м<sup>3</sup>/год)

Товщина напиленого покриття пропорційна тепловій потужності плазмового струменю  $q$ . Відношення теплової потужності струменю до теплового еквіваленту електричної потужності дуги характеризує ефективний коефіцієнт корисної дії  $\eta'$  процесу нагрівання:

$$\eta' = \frac{q}{UI} \quad (8.1)$$

де  $U, I$  – напруга та струм електричної дуги.

Експерименти показують, що ефективний ККД при газоплазмовому напилюванні залежить від напруги дуги і може коливатися в межах – від 0,35 до 0,90 (рис. 8.8). Збільшення довжини дуги, що призводить до зростання напруги дуги різко знижує ефективність нагрівання. Наприклад, при розпилювання цинку  $\eta'$  складає 0,9 при напрузі  $U = 20$  В, а в іншому випадку при напрузі 60 В ККД знижується до значення 0,4. Виміри показують, що сума анодного і катодного спаду напруги в цьому процесі складає 19,09 – 19,99 В. Таким чином, при зменшенні довжини дуги основним джерелом нагрівання стають активні плями дуги, використання яких підвищує ефективність напилювання.

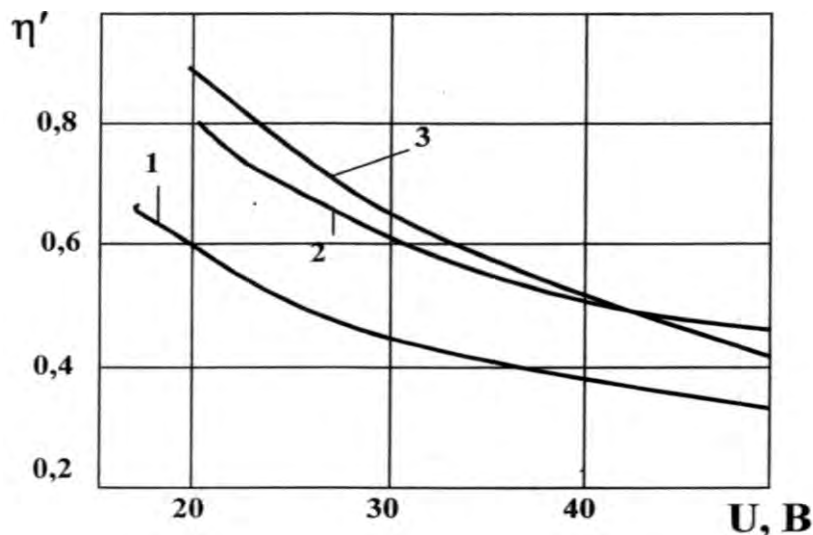


Рисунок 8.8 – Залежність ефективного ККД нагрівання  $\eta'$  від напруги дуги плазмотрону:

1 – напилення алюмінію А-99; 2 – напилення матеріалу 85%Cu+10%Mo+2%MoO<sub>3</sub>+1%C+2%Ni; 3 – напилення СОК-15.

## 8.2 Експериментальна установка і методика для дослідження електромагнітних пускачів з напиленими контакт-деталлями

Мета дослідження електроерозійної стійкості – визначення закономірностей масопереносу та математичного закону зміни маси відновлених контакт-деталей від виду контактного матеріалу, величини напруги, струму, кількості комутаційних циклів. Випробування здійснюються для пускачів відкритого виконання без теплового реле. Дослідження проводилися за методикою, яка викладена в нормативній документації на випробування електричних апаратів, з використанням спеціальної лабораторної установки.

Для отримання оцінок показників надійності з заданою точністю та імовірністю, вибирається план випробування на надійність NUT, який передбачає одночасне випробування вибірки із N контакт-деталей: контакт-деталі, що відмовили не відновлюються і не замінюються, а випробування припиняють після наробітку  $T$  комутаційних циклів [92]. Об'єм вибірки  $N$  визначається, виходячи із гіпотези про нормальний закон розподілу імовірності безвідмовної роботи розривних контактів [107]. Дані для розрахунку:

- нижня довірча границя імовірності безвідмовної роботи  $P(T) = 0,85$ ;
- довірча імовірність, 0,95;
- допустиме число відмов,  $d = 0$ .

За вибраними значеннями і по таблиці Г.2 [92] визначається необхідний обсяг вибірки  $N = 12$  контакт-деталей (4 пускачі).

У випадку заміни серійних контактів пускачів на основі срібла на напилені контакт-деталі на основі міді проводяться комутаційні і кліматичні випробування пускачів. Комутаційні випробування проводяться при нормальних кліматичних умовах ( $t = 25 \pm 10 \text{ C}^\circ$ ,  $\varphi = 45 - 80\%$ ,  $\rho = 84 - 100 \text{ кПа}$ ) і розподіляються на:

- випробування на вмикаючу і вимикаючу здатність (номінальну комутаційну здатність); для пускачів контролюється в режимі виняткових комутацій. Установка передбачає випробування одночасно двох пускачів з серійними або дослідними контактами. Режим випробування згідно табл. 8.2;

- випробування на комутаційну зносостійкість; контролюється в режимі нормальних комутацій. Схема дає можливість одночасного проведення випробування декількох пускачів. Режим згідно табл. 8.2.

Кліматичні випробування пускачів проводяться в режимі нормальних комутацій при впливі корозивного середовища з агресивними компонентами, частота комутацій вибирається, виходячи з вимог [85, 75]. Застосовуються основні положення методики лабораторних кліматичних досліджень.

Загальний вигляд установки наведено на рис. 8.2. Досліджуються комутуючі пристрої пускачів ПМЛ-3200.04 I ПМЛ-4200.04 з виконанням по клас зносостійкості В з відновленими дослідними контакт-деталлями. З великої кількості дослідних контакт-деталей, що пройшли лабораторні кліматичні випробування для подальшого дослідження відібрані контактні матеріали, що напилилися, з таких композицій:

1. Латунь Л62 [108];
2. КМК-А10м (85%Ag+15%СdO) [92];
3.  $\text{Cu}+(12-15\%)\text{Nb}+(0,8-1,0\%)\text{Zr}+(0,3-0,5\%)\text{Y}_2\text{O}_3$  [5];
4.  $\text{Cu}+(10-15\%)\text{Mo}+(2-3\%)\text{MoO}_3+(1-3\%)\text{C}+(0,8-1,0\%)\text{Ni}$  [47].

-

## Результати розрахунків параметрів навантажувального кола пускачів

Тип апарату	Номинальний струм пускача, А	Номинальний робочий струм, А	Параметри навантаження Z, Ra в Ом; L в мГн	Струм увімкнення, А	Струм вимикання, А	Частота комутацій, цикл/год
Режим нормальних комутацій. Увімкнення: $U_{np} = 380$ В						
ПМЛ-3200	40	40	$Z=3,66; Ra=2,38; L=8,84$	240	-	240
ПМЛ-4200	63	63	$Z=1,46; Ra=0,51; L=4,35$	378	-	120
Вимикання: $U_{np} = 64,6$ В						
ПМЛ-3200	40	40	$Z=3,73; Ra=2,42; L=9,02$	-	40	240
ПМЛ-4200	63	63	$Z=1,49; Ra=0,52; L=4,44$	-	63	120
Режим виняткових комутацій Увімкнення: $1,1 U_{np} = 418$ В						
ПМЛ-3200	40	40	$Z=2,41; Ra=1,57; L=5,83$	400	-	36
ПМЛ-4200	63	63	$Z=0,97; Ra=0,34; L=2,89$	630	-	36
Вимикання: $1,1 U_{np} = 418$ В						
ПМЛ-3200	40	40	$Z=3,02; Ra=1,96; L=7,30$	-	320	10
ПМЛ-4200	63	63	$Z=1,21; Ra=0,42; L=3,61$	-	504	10

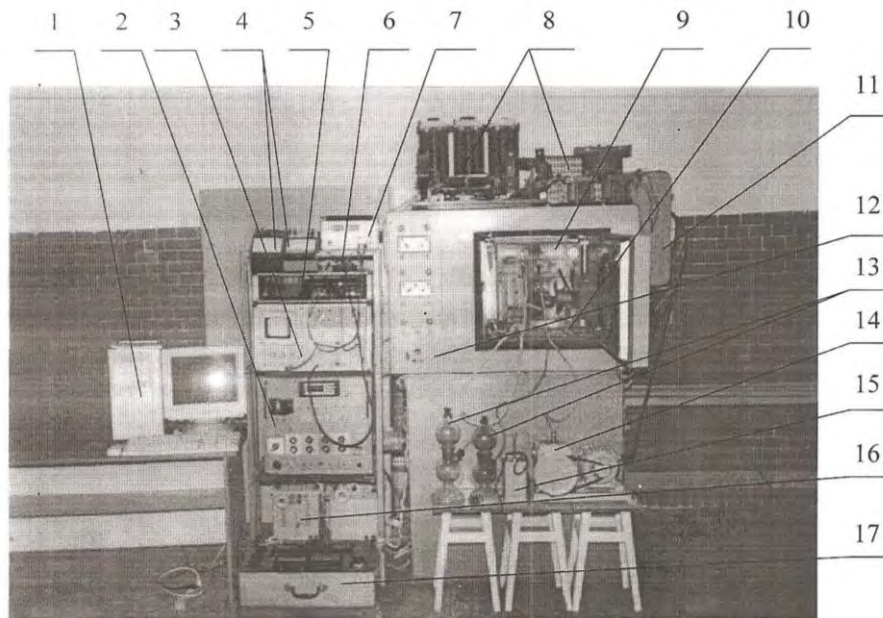


Рисунок 8.2 – Лабораторна установка для експериментального дослідження електромагнітних пускачів з напиленими контакт-деталлями:

1 – персональний компютер; 2 – блок керування; 3 – осцилограф С8-14; 4 – прилади: вольтметр Э510, амперметр Э514; 5 – цифровий вольтметр В2-36; 6 – шунт 75 ШСМЗ-25-05; 7 – блок живлення; 8 – навантажувальний контур; 9 – герметична приставка (ексикатор); 10 – робочий відсік камери SKR-200/25; 11 – електричний щит мережі 380 В; 12 – кліматична камера SKR-200/25; 13 – Апарати Кіпа; 14 – вакуум – нагнітач; 15 – газоаналізатор УГ-2; 16 – трифазний трансформатор 280/65В; 17 – комплект приладів К-506.

Електрична принципова схема установки для експериментального дослідження пускачів в категорії застосування АС-3 представлена на рис. 8.3 (позначення елементів схеми для режиму нормальних комутацій). Схема забезпечує проведення випробування пускачів в наступних режимах з такими параметрами навантажувального кола (контур):

1) режим нормальних комутацій:

- для ПМЛ-3200 ( $I_{НОМ}=40\text{А}$ ,  $U_{НОМ}=380\text{В}$ ):

- увімкнення:  $I_{ВМИК}=6 \cdot I_{НОМ}$ ;  $U_{ВМИК}=U_{НОМ}$ ;  $\cos\varphi=0,65$ ;

- вимикання:  $I_{ВМИК}=I_{НОМ}$ ;  $U_{ВМИК}=0,17 \cdot U_{НОМ}$ ;  $\cos\varphi=0,65$ ;

- для ПМЛ-4200 ( $I_{НОМ}=63\text{А}$ ,  $U_{НОМ}=380\text{В}$ ):

- увімкнення:  $I_{ВМИК}=6 \cdot I_{НОМ}$ ;  $U_{ВМИК}=U_{НОМ}$ ;  $\cos\varphi=0,35$ ;

- вимикання:  $I_{ВМИК}=I_{НОМ}$ ;  $U_{ВМИК}=0,17 \cdot U_{НОМ}$ ;  $\cos\varphi=0,35$ ;

2) режим виняткових комутацій:

- для ПМЛ-3200 ( $I_{НОМ}=40\text{А}$ ,  $U_{НОМ}=380\text{В}$ ):

- увімкнення:  $I_{ВМИК}=10 \cdot I_{НОМ}$ ;  $U_{ВМИК}=1,1 \cdot U_{НОМ}$ ;  $\cos\varphi=0,65$ ;

- вимикання:  $I_{\text{ВИМ}} = 10 \cdot I_{\text{НОМ}}$ ;  $U_{\text{ВМИК}} = 1,1 \cdot U_{\text{НОМ}}$ ;  $\cos\varphi = 0,65$ ;
- для ПМЛ-4200 ( $I_{\text{НОМ}} = 63\text{А}$ ,  $U_{\text{НОМ}} = 380\text{В}$ ):
  - увімкнення:  $I_{\text{ВМИК}} = 10 \cdot I_{\text{НОМ}}$ ;  $U_{\text{ВМИК}} = 1,1 \cdot U_{\text{НОМ}}$ ;  $\cos\varphi = 0,35$ ;
  - вимикання:  $I_{\text{ВИМ}} = 8 \cdot I_{\text{НОМ}}$ ;  $U_{\text{ВМИК}} = 1,1 \cdot U_{\text{НОМ}}$ ;  $\cos\varphi = 0,35$ ;

*Умови дослідження.* Робоче положення пускатів в просторі, які розміщені на спеціальному монтажному блоці – вертикальне, що найбільше відповідає умовам монтажу пускатів відкритого виконання в експлуатації. Струмопідвід пускатів ПМЛ 3 і 4 величини виконується мідними провідниками з поперечним перерізом  $10\text{ мм}^2$ . Джерело живлення і навантажувальний контур приєднуються до апаратів згідно інструкції по експлуатації.

*Опис електричної схеми і методика дослідження.* До випробувального (силового) кола установки входять: джерело живлення, досліджувані пускачі, активне і реактивне навантаження, з'єднувальні провідники і необхідна вимірювальна апаратура. Вся установка вмикається під напругу автоматичним вимикачем QF. Як джерело живлення використовується автономний трансформатор, який забезпечує стабільною напругою увімкнення установку ( $380$  і  $418\text{ В}$ ,  $50\text{ Гц}$ ), що подається на досліджувані пускачі шляхом вмикання пускача КМ1. Для забезпечення величини напруги вимикання  $0,17 \cdot U_{\text{НОМ}} = 64,6\text{ В}$  використовується знижувальний трансформатор TV1  $380/65\text{ В}$  і пускач КМ2. Всі 8 дослідних пускатів приєднуються паралельно до навантажувального кола. Для отримання заданих значень струму і коефіцієнта потужності випробувального кола, послідовно з пускачами вмикаються регульовані резистори RR (тип РСПС) і котушки індуктивності без феромагнітних сердечників LR, які імітують відповідно активне і індуктивне навантаження. Щоб зменшити вплив взаємних електромагнітних полів (взаємоіндукцію), котушки індуктивності розміщуються в просторі в трьох взаємно перпендикулярних площинах. Для отримання відповідних значень активного і індуктивного опорів використовуються наступні формули і вищенаведені числові значення параметрів навантажувального кола.

$$Z = \frac{U_{yB}}{\sqrt{3} \cdot I_{yB}}, \text{ Ом} \quad (8.2)$$

Активний опір  $R_a$  резисторів RR:

$$R_a = Z \cdot \cos\varphi_{yB}, \text{ Ом.} \quad (8.3)$$

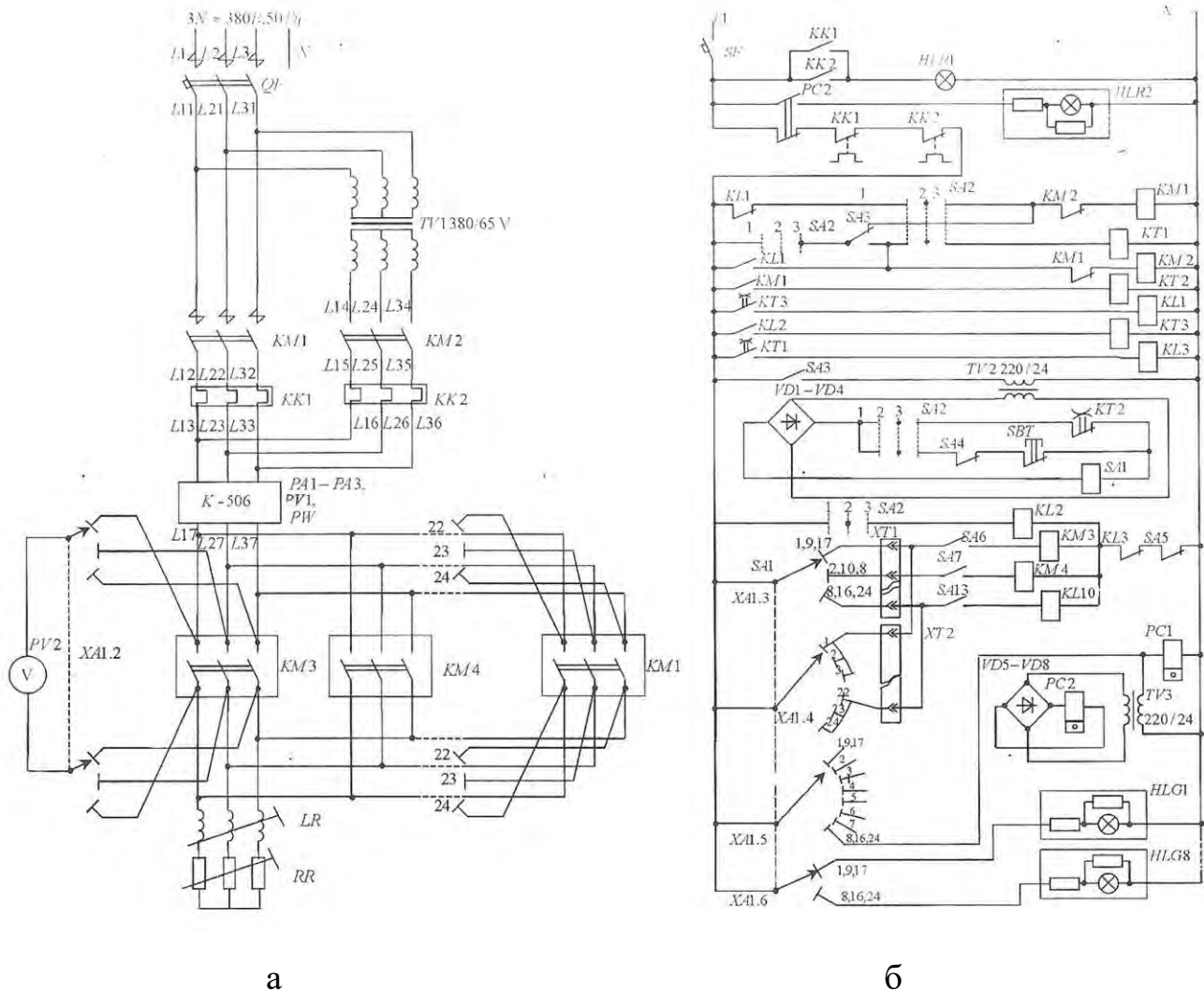


Рисунок 8.3 – Електрична принципова схема установки для експериментального дослідження електромагнітних пускачів. Повний опір кола  $Z$  (для режиму увімкнення):

а – схема силового кола; б – схема керування

Індуктивність  $L$  реакторів  $LR$ :

$$L = Z \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \phi_{y\phi}}}{\omega}, \text{ Гн}, \quad (8.4)$$

де  $\omega = 2\pi f$  – кругова частота напруги,  $f = 50$  Гц.

Коефіцієнт потужності  $\cos \phi$  визначається за сталими кола [153]:

$$\phi = \arctg \frac{\omega L}{R} \quad \text{або} \quad \cos = \frac{R}{Z} \quad (8.5)$$

Результати розрахунків параметрів навантаження пускачів для категорії застосування АС-3 наведено в табл. 8.2.

Необхідною апаратурою для вимірювання і контролю параметрів навантажувального кола є комплект приладів К-506 з трансформатором струму і цифровий вольтметр РУ2 (В7-35) для вимірювання спаду напруги на кожному полюсі пускачів.

Блок керування даної установки забезпечує почерговий вибір об'єкту (пускача), тривалість інтервалу часу протікання пускового струму (увімкнення) і струму вимикання та тривалість інтервалу паузи, причому в другий (наступний) інтервал відбувається заміна пускача. Це досягається шляхом застосування в схемі кількох проміжних реле, перемикачів і реле часу. До складу принципової схеми керування входить кроковий перемикач SA1 (тип ПТИ-М, що має 6 рядів ковзних контактів, в кожному по 24 шт.), контакти якого почергово вибирають досліджуваній пускач, а в режимі вимірювання ще й почергово приєднують виводи цифрового вольтметра В7-35 до контактів. Ковзні контакти перших двох рядів ХА1.1-ХА1.2 припаяні до силових провідників, які пригвинчені до контактотримачів пускача і приєднані до вольтметра. Третій ряд контактів ХА1.3 приєднується через розбірне з'єднання (колодку) ХТ1 до котушок керування пускачів. Тумблери SA6-SA13 слугують для індивідуального увімкнення кожної котушки і, при проведенні вимірювання в ручному режимі, для виміру спаду напруги. Четвертий ряд контактів ХА1.4 використовується тільки в режимі вимірювання, коли розбірне з'єднання ХТ1 замінюється на з'єднання ХТ2 і вимірювання проводяться в автоматичному режимі. Для визначення кількості комутацій, які виконані кожним пускачем, використовується п'ятий ряд контактів ХА1.5 перемикача SA1, завдяки чому подається напруга на лічильник імпульсів РС1. Завдяки лічильнику РС2 установка вимикається від мережі після визначеної кількості циклів комутації: 50, 100, 150, 200, 250 і 300 тис. Про це свідчить червона сигнальна лампа HLR2. Сигнальна лампа HLR1 використовується для сигналізації аварійного вимкнення схеми установки. Для контролю черговості комутації пускачів і замірів спаду напруги змонтовані зелені сигнальні лампи HLG1-HLG8, напруга на які подається через шостий ряд ковзних контактів ХА1.6.

Живлення схеми керування здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В через автоматичний вимикач SF. Пакетний перемикач SA2 дозволяє переводити схему керування в ручний (позиція 3) і автоматичний (позиція 2) режими роботи та вимірювання. Потім, завдяки замикаючому контакту проміжного реле KL1 і пакетному перемикачу SA2, спрацьовує котушка електромагнітного пускача KM1 і на дослідні пускачі подається



напруга увімкнення. При цьому з витримкою часу (завдяки реле часу КТ2) живлення подається на котушку крокового перемикача SA1 і вмикається дослідний пускач КМ3, який комутує напругу увімкнення. Одночасно напруга подається на котушку проміжного реле КЛ2, яке своїм замикаючим контактом вмикає коло реле часу КТ3. Це реле з витримкою часу вмикає проміжне реле КЛ1. Спрацювання цього реле приводить до подачі в силове коло напруги вимикання (увімкнення пускача КМ2) і подачу напруги живлення на реле часу КТ1. Через визначений проміжок часу спрацьовує проміжне реле КЛ3 і вимикається дослідний пускач КМ3 від мережі (при цьому відбувається комутація струму вимикання). Після цього знеструмлюється реле КЛ1 і відбувається подача в схему напруги увімкнення і весь цикл повторюється з тією різницею, що вмикається наступний дослідний пускач КМ4. Витримки реле часу КТ1, КТ2 і КТ3 підбираються дослідним шляхом з урахуванням режиму і частоти комутації пускачів. Кнопка SBT і перемикачі SA3-SA13 використовуються в ручному режимі для проведення вимірювання. В автоматичному режимі вимірювання спаду напруги на полюсах пускачів відбувається завдяки збільшенню витримки часу на розмикання до 10 с реле КТ2.

Загальна кількість комутаційних циклів увімкнення-вимкнення для всіх пускачів приймається однаковою і рівною 300 тис. Необхідні вимірювання проводяться через кожні 50 тис. комутаційних циклів. Струмові навантаження вибираються (для пускачів 3 і 4 величини), виходячи із тезису, що номінальні робочі струми пускачів є: 40; 63А. Випробування проводяться при впливі спеціального корозивного середовища, яке складається із суміші газів  $\text{NH}_3$  +  $\text{H}_2\text{S}$ .

Номінальне верхнє значення концентрації аміаку і сірководню становить відповідно  $30 \text{ мг/м}^3$  і  $25 \text{ мг/м}^3$ . Контакт-деталі зважуються разом із контактотримачами.

Обробка експериментальних даних з метою визначення математичного закону зміни маси контакт-деталей як функції наробітку проводиться за методикою, яка приведена в роботі [12]. Результати обробки і коефіцієнти інтенсивності зношування наведені в додатку А, табл. 8.2.

Електроерозійний знос визначається на основі зміни маси:

$$m_2 = m_1 - k \cdot n, \quad (8.6)$$

де  $m_1$  – маса контакту перед початком комутаційних випробувань, г;  
 $m_2$  – маса контакту після серії комутаційних випробувань, г;  $k$  – коефіцієнт інтенсивності зношування, г/цикл;  $n$  – кількість комутаційних циклів, цикл.

## 9 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ЗЧЕПЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ КОНТАКТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЗНОШЕНІ ДЕТАЛІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

### 9.1. Визначення твердості

Твердість оцінюється опором, що одне тіло робить проникненню в нього іншого, більш твердого тіла. Ця характеристика відбиває цілий комплекс механічних властивостей. Випробування на твердість матеріалів з покриттями проводиться для контролю якості нанесеного шару, виявлення змін у поверхневих ділянках основного металу, для оцінки структурної неоднорідності по перерізу покриття, з метою дослідження закономірностей зношування покриттів, визначення міцності з'єднання покриття з основним металом тощо. Дані про твердість широко використовуються завдяки ряду достоїнств цього методу: можливість 100 % контролю деталей після нанесення покриття, випробування не є руйнуючими, виміри можна робити безпосередньо на контакт-деталі; серійні прилади не складні побудовою, продуктивні і зручні в експлуатації.

Існують стандарти, що регламентують вимірювання твердості [28, 40]. Стандарт [38] визначає параметри і межі допустимої похибки стаціонарних твердомірів, що випускаються вітчизняною промисловістю.

Метод вимірювання твердості по Роквелу завдяки простоті й оперативності вважається одним з найпоширеніших. Сутність його полягає в тому, що у випробувану поверхню вдавлюється алмазний конус чи сталева кулька. Безрозмірною одиницею твердості є величина, що відповідає переміщенню кінцевика на глибину  $2 \cdot 10^{-3}$  мм. Переміщення фіксується індикатором годинникового типу, а значення твердості фіксуються безпосередньо на шкалі твердоміра. Діаметр кульки 1,5875 мм (1/16 дюйма), кут при вершині алмазного конуса  $120^\circ$  (2,1 рад). Для того, щоб усунути вплив вібрації і тонкого поверхневого шару, робиться попереднє навантаження зусиллям 100 Н (10 кгс). Потім діє основне навантаження: для шкали А – 490 Н (50 кгс), для шкали В – 883 Н (90 кгс) і для шкали С – 1472 Н (150 кгс). По різних шкалах відліку значення твердості позначаються HRA, HRB, HRC.

Твердість за Бринелем (HB) визначають, головним чином, у м'якого основного металу: сталі після відпалу, нормалізації, бронз, латуней тощо. Суть методу полягає в тому, що в поверхню зразка вдавлюється сталева загартована кулька діаметром 10 або 2,5 мм. Регламентується час витримки під

навантаженням і величина навантаження, причому остання підбирається таким чином, щоб її відношення до квадрата діаметра кульки було постійним. Значення твердості визначається за діаметром відбитка, що залишився на поверхні зразка після зняття навантаження.

Відповідно до стандарту [28], вимірювання твердості по Виккерсу проводяться при навантаженнях від 9,8 Н (1 кгс) до 980 Н (100 кгс). За схемою навантаження метод нагадує вимір твердості по Бринелю, тільки індентором виступає чотирикутна алмазна піраміда з кутом між протилежними гранями 2,38 рад (136°). Числове значення твердості по Виккерсу (HV) визначають по довжині діагоналі відбитка, використовуючи спеціальні таблиці. При вимірі твердості необхідно, щоб мінімальна товщина покриття була більше діагоналі відбитка в 1,2 рази. Методом Виккерса можна вимірювати твердість поверхневих шарів покриття товщиною до 0,03 – 0,5 мм.

Розмірність значень твердості, визначених по методу Бринеля чи Виккерса, однакова — Па (МПа) (кгс/мм<sup>2</sup>); крім того, для матеріалів із твердістю до HV 450 числа твердості збігаються. Метод звичайно застосовують для матеріалів, у яких HV > 360, тобто для термозміцнених сталей, зносостійких покриттів тощо. З усіх методів виміру твердості розглянутий найбільш досконалий, тому що дозволяє одержувати чисельні значення практично для будь-яких матеріалів і в будь-яких інтервалах твердості.

Методом мікротвердості знаходять твердість мікрооб'ємів покриття. Основне призначення методу – дослідження твердості окремих часток, структурних складових, а також анізотропії твердості в різних ділянках покриття. Розрізняють два методи іспитів: по відновленому відбитку (основний метод) і по невідновленому відбитку (додатковий метод) [36]. Результат іспиту за першим методом характеризує опір матеріалу пластичної і пружної деформації при вдавненні алмазного наконечника статичним навантаженням протягом визначеного часу. Після зняття навантаження і видалення наконечника вимірюють параметри відбитка, що залишився, за яким, користаючись формулами і таблицями, визначають величину мікротвердості. Найбільше поширення одержали випробування з застосуванням кінцевика у формі чотирикутної піраміди з квадратною підставкою з кутом, що складає 2,38 рад (136°). Тривалість дії навантаження повинна бути не менш 3 с. Шорсткість робочої поверхні (площина шліфа)  $R_a \leq 0,32$  мкм. Значення мікротвердості  $H$  у цьому випадку обчислюють за формулою:

$$H=1,854 \cdot P/d^2, \quad (9.1)$$

де  $P$  – нормальне навантаження, що прикладене до алмазного кінцевика;  
 $d$  – середнє арифметичне довжин обох діагоналей квадратного відбитка.

Для полегшення визначення числових значень мікротвердості при різних навантаженнях складені спеціальні таблиці. Діапазон застосовуваних навантажень 0,049 – 4,905 Н.

Зразками для вимірів мікротвердості служать металографічні шліфи. Мікротвердість покриття можна визначати на повздовжніх і поперечних шліфах. При використанні поперечних шліфів з покриттями слід дотримуватися наступних умов: відстань від центра відбитка до грані покриття повинно бути не менш подвійного розміру відбитка; відстань між центрами відбитків нанесених на поверхню покриття, повинне перевищувати розмір відбитка більш ніж у три рази.

У дослідницькій практиці для визначення мікротвердості покриттів найчастіше використовується прилад марки ПМТ-3.

До недоліків методу виміру мікротвердості варто віднести високий рівень похибки, що особливо зростає при дослідженні покриттів із застосуванням малих навантажень. Тому бажано, щоб діагональ відбитка була не менше 8 – 10 мкм. Величина похибки залежить від ідентичності навантаження, вибору оптимального навантаження, якості налаштування систем приладу й інших причин.

## 9.2 Оцінка втомленої міцності

Під терміном «втома» розуміють процес поступового нагромадження пошкоджень матеріалу під дією змінних напруг, що призводить до зміни властивостей, утворенню і розвитку тріщин і руйнуванню [41].

Втома залишається однією з найважливіших проблем машинобудування, тому що більш 80 % руйнувань деталей і конструкцій носять характер втоми.

За результатами досліджень зразків з покриттями на втому можна: відпрацьовувати технологію напилювання покриттів; вибирати оптимальне сполучення хімічного складу, структури і властивостей матеріалів покриття й основного металу; розраховувати і проектувати конструкції; проводити проміжний і вихідний контроль якості композиції «покриття – основний метал»; здійснювати контроль відповідальних деталей з покриттями перед експлуатацією.

Особливістю досліджень на втому матеріалів з покриттям є велика кількість факторів, що впливають на межу витривалості. Головними з них можна відзначити наступні: будова покриттів і основного метала (структура, пористість, шорсткість, товщина покриття, характер з'єднання на межі розділу або наявність переходної зони тощо.); технологія виготовлення зразків (розміри і форма, наявність відсутності концентраторів напруг, спосіб нанесення покриттів, величина розподілу і знак залишкових напруг, попередня підготовка поверхні металевого зразка перед нанесенням покриття тощо); режим навантаження (частота, період, максимальна напруга, амплітуда, коефіцієнт асиметрії циклу напруг тощо); середовище експлуатації (наявність агресивного середовища, підвищена чи знижена температура тощо).

Підвищення зносостійкості, поліпшення захисних властивостей і багатьох експлуатаційних характеристик покриття звичайно супроводжуються зниженням втомленої міцності.

Модель механізму зародження тріщини в композиції «основний метал – покриття» при циклічному навантаженні запропонована в роботах [49, 50]. Схема заснована на припущенні, що покриття блокує дислокації в поверхневому шарі основного метала і знижує розвиток пластичної деформації. При навантаженні джерело дислокацій починає функціонувати, випускаючи дислокації. Границя «покриття – основний метал» блокує дислокації, створюючи локальні підвищення їх щільності. У мікрооб'ємі, що безпосередньо прилягає до границі, утворюється плоске скупчення граничних дислокацій, причому вони можуть знаходитися на настільки близькій відстані один від одного, що їх екстраплощини зливаються, викликаючи появу розтягуючих напруг  $\sigma_n$ . Якщо покриття достатнє крихке, то розтягуючі напруги призводять до виникнення в покритті мікротріщин, що поширюються в основний метал.

Відповідно до іншої схеми, поява і поширення тріщин може відбуватися безпосередньо від поверхні покриття. Відомо, що навіть на гладких зразках при циклічному напруженні тріщини з'являються насамперед на поверхні. Що стосується поверхні покриття, на якій завжди є готові концентратори напруг у вигляді порожнин, нерівномірностей, то вона відіграє роль джерела тріщин і зменшує довговічність композицій «основний метал – покриття».

Очевидно, залишкові внутрішні напруження, що виникають при формуванні покриття, відіграють двояку роль при виникненні і поширенні втомлених тріщин. Якщо в покритті і приповерхневих шарах основного метала є стискаючі залишкові напруги, то вони збільшують довговічність, затримуючи зародження і поширення втомлених тріщин. При утворенні напруг

розтягування (що відбувається частіше), несприятливих з погляду конструктивної міцності, руйнування зразка прискорюється завдяки посиленню напруженості стану та ініціюванню утворення тріщин.

Отримано результати, що показують зв'язок довговічності газоплазмових покриттів з карбїду титана з розподїлом залишкових напруг по товщинї покриття. У поверхневому шарї покриття значні напруги розтягування призводять до відшарування покриття вже в початковий перїод навантаження. Залишкові напруги стиску, які виявлені в центральній частинї шару і досягають 450 МПа, змінюють характер трїциноутворення, переносячи осередки зародження трїцини під покриття.

Втомлені навантаження зразків з покриттями іноді супроводжується відшаровуванням покриття від основного металу. Руйнування може носити адгезійний, когезійний або змішаний характер. В окремих випадках втомлена міцність обмежується міцністю зчеплення покриття з основним металом.

Мікроскопічні дослідження поперечних шліфів, що вирізані із зон втомленого руйнування, виявили велику кількість трїцин, перпендикулярних границі покриття з основним металом. Звичайно трїцини проходять через частки і зупиняються на межі, що розділяє частки. Ця особливість характерна як для крихких покриттів, так і для пластичних.

Експерименти проводилися на спеціальній установці, що складається з двох пристроїв. Один з них призначений для визначення довговічності, а інший – для дослідження закономірностей зародження і поширення втомлених трїцин. Дослідження проводилися за такою методикою. На стандартні зразки наноситься покриття й оцінюється його вплив на опір втоми в порівнянні з контрольними зразками. Розміри гладких зразків круглого і прямокутного перерізу, застосовуваних для утомлених дослідів, стандартизовані. Виготовляються типові машини для дослідів по різних схемах навантаження: чистий і консольний вигин обертового зразка, вигин плоских зразків, розтягання – стиск, скручування. Стандарт [41] визначає характеристики механічних, електромеханічних і гїдравлічних машин. Нормуються наступні параметри: найбільше сумарне навантаження, найбільша амплїтуда навантаження, частота циклів комутації апаратів.

Дослідження плоских контактів з покриттями проводяться на комбінованих експериментальних установках, що дозволяють визначати границю витривалості, будувати криві малоциклїчної втоми, спостерїгати за процесом зародження трїцини в покритті від заздалегїдь створеного

концентратора напруги, визначати кінетику поширення тріщини в покритті та в основному металі.

Методика утомлених дослідів, при якій реєструється тільки кількість циклів до зношення, не відповідає зростаючим вимогам практики, не дає картини поширення втомлених тріщин. Тому, все частіше проводяться дослідження з безперервною реєстрацією довжини тріщини, що розвивається.

Виникаючі в шарі напруги обумовлюють низькі механічні властивості металізованих покриттів. Як видно з даних табл. 9.1, на міцність покриттів мало впливає спосіб нанесення (електродуговий або газоплазмовий).

Таблиця 9.1

### Механічні властивості металізованих покриттів

Метал	Тимчасовий опір, кг/см <sup>2</sup>				Твердість по Бринелю	
	при розтягуванні		при стисканні		ЭМ-3	ГИМ
	ЭМ-3	ГИМ	ЭМ-3	ГИМ		
Мідь МІ	8,2	5,4	28,4	32,0	66	64
Латунь Л62	3,8	5,2	18,5	20,4	50	63
Алюміній А99	5,4	5,0	14,2	13,1	27	26
Цинк Ц1	3,4	3,2	11,5	10,7	20	20
85%Ag+15%CdO	9,1	5,7	28,2	33,0	88	105
85%Cu+10%Mo+2%MoO <sub>3</sub> + +1 %C+2%Ni	8,7	5,3	18,9	19,7	95	85

Напилений метал відрізняється низькою пластичністю і ударною в'язкістю, в зв'язку з чим руйнування покриттів відбувається з утворенням крихкого зламу.

Не дивлячись на низькі механічні властивості напиленних покриттів, їх міцність при сумісній роботі достатня, щоб відновлені контакти витримали комутаційний ресурс в 300 тис. циклів комутації. Під дією зусиль розтягування, згинання і скручування руйнування металізованих покриттів

контактів відбувається лише після того, як буде перебільшена границя пружних деформацій основи. Така поведінка покриттів пояснюється тим, що напилений метал має низький модуль пружності, котрий наприклад, для напиленої міді дорівнює 4000 кг/мм<sup>2</sup> (замість 10000 кг/мм<sup>2</sup> для литої). Тому навантаження, яке сприймається контактотримачем і покриттям, буде розподілятися між ними пропорційно величинам їх модулів пружності. Таким



чином, під час роботи контакту, нанесене на нього покриття, завжди відчуває в декілька більшу напругу, ніж сам контактотримач.

Характерною особливістю металізованих покриттів, як вже відмічалось вище, є їх пористість і внаслідок цього більш низька, ніж у попереднього металу, густина (табл. 9.2).

Таблиця 9.2

### Густина газоплазмових покриттів різноманітних матеріалів

Метал	Густина напиленого металу	
	г/см <sup>3</sup>	% від густини порошку
Алюміній	2,41	90
Цинк	6,36	80
Олово	6,43	88
Мідь	7,53	84
СОК-15 (85 %Ag+15 %CdO)	8,11	85
85%Cu+10%Mo++2%MoO <sub>3</sub> +1 %C+2%Ni	8,05	83

Кількість порожнин і їх розміри, а відповідно, і густина напиленого металу в залежності від умов металізації змінюються в широких межах. В багатьох випадках пористість покриттів виключає можливість їх застосування, в інших вона є властивістю корисною.

Пористість покриттів, їх забруднення оксидами і характер зв'язку часток одна з одного є причиною значної різниці властивостей покриттів від властивості металів до їх напилення. Дані про зміну деяких властивостей покриттів, отриманих внаслідок газоплазмового напилювання, наводяться в табл. 9.3.

### 9.3. Оцінка проникності

*Проникність* – це здатність матеріалу пропускати крізь себе рідини та газу. Особливо важливо знати проникність для захисних покриттів, що працюють в агресивному середовищі при високій температурі.

Числовими критеріями проникності є коефіцієнти проникності  $K_n$  і фільтрації  $K_\phi$ . Проникність збільшується зі збільшенням пористості, а також залежить від перепаду напруг у зразку, товщини та анізотропії покриття.

## Деякі фізичні властивості напилених металів

Метал	Теплоємність (при 15°C), ккал/кг град		Коефіцієнт тепло- провідності $\lambda$ , кал/м <sup>2</sup> град	
	напиленого	литого	напиленого	литого
Цинк	0,082	0,092	60,0	95,0
Алюміній	0,193	0,214	31,0	123,0
Латунь	–	–	12,0	73,5
СОК-15 (85%Ag+15%CdO)	0,213	–	20,0	–
85 %Cu+10 %Mo+ +2%MoO <sub>3</sub> +1%C+ 2%Ni	0,028	–	24,0	–
	Коефіцієнт теплового розширення $\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> мм/мм °C		Питомий опір $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м	
	напиленого	литого	напиленого	литого
Цинк	12,4	32,0	0,142	0,06
Алюміній	12,1	23,7	0,295	0,029
Латунь	11,8	17,2	0,817	0,07
СОК-15 (85%Ag+15%CdO)	10,3	–	0,28	–
85 %Cu+10 %Mo+ +2%MoO <sub>3</sub> +1%C+ 2%Ni	10,4	–	0,32	–

Звичайно спостерігається гарна кореляція між значеннями пористості та проникністю. Це може бути використано, для виявлення мікротріщин покриття [44, 45]. При аналізі плазмових та окисних покриттів було знайдено, що газопроникність на порядок або більше перевищує значення їх відкритої пористості. В результаті мікроскопічних досліджень покриттів зафіксували наявність мікротріщин, які збільшуючи пористоість різко підвищують газопроникність. Проникності покриттів, отриманих різними методами, можуть відрізнятися на п'ять порядків, але навіть найбільш міцні газоплазмові покриття не зможуть надійно захисти від корозії в особливо агресивних середовищах [14, 23, 52, 75].

Найбільш точним, але трудомістким є метод розрахунку проникності за даними, що отримані на ртутних порометрах [47, 69].

## 9.4 Електроерозійна стійкість контактів

Проведені експериментальні дослідження показали, що метод ЕІЛ можна використати для відновлення контактних поверхонь електричних апаратів.

Цей метод дав значний ефект при нанесенні покриття на II і III режимах сріблення.

При нанесенні срібного матеріалу на мідну пластину (1x1 см) на II режимі ( $I_p = 0,8...0,9$  А) отримують досить значний коефіцієнт переносу (в середньому близько 52 %) і високе значення приросту катоду (рис. 9.1). При цьому використовувався електрод СН-10, діаметром 2 мм.

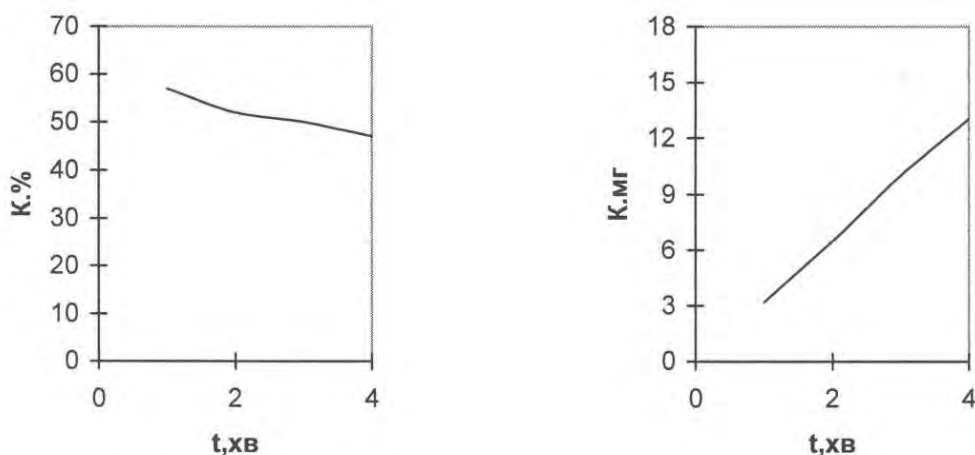


Рисунок 9.1 – Залежність коефіцієнта масопереносу і надважки катода при II режимі ЕІЛ від часу

При нанесенні чистого срібла (діаметр 2 мм) на таку ж пластину коефіцієнт переносу був дещо меншим, найбільший був він за першу хвилину переносу, далі знизився, приріст переносу був досить стабільним.

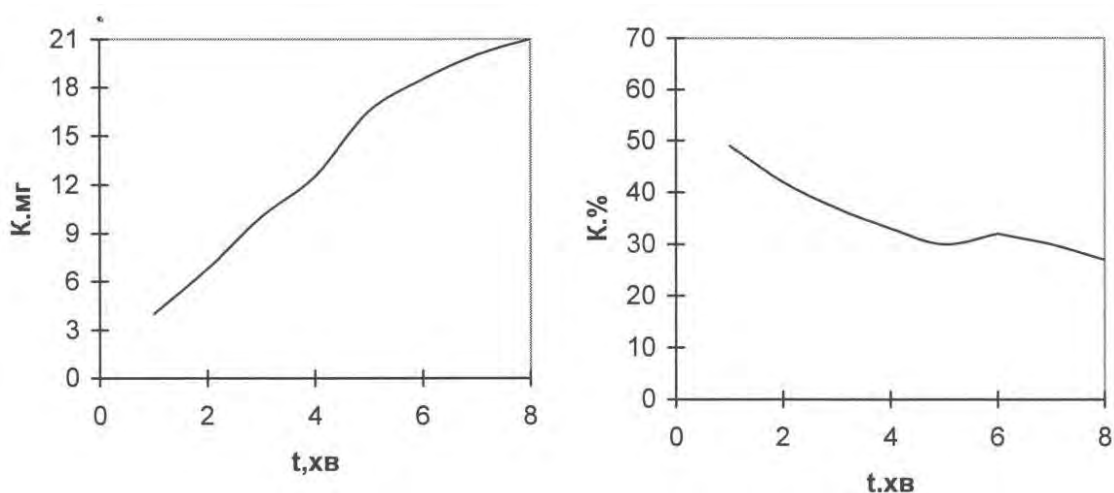


Рисунок 9.2 – Залежність коефіцієнта масопереносу і надважки катода при II режимі ЕІЛ від часу

При нанесенні покриття на III режимі використовувались у якості матеріалу мідні заклепки з гальванічно нанесеним нікелевим покриттям, що імітували контактну поверхню, а також мідна пластина. При нанесенні покриття на мідну пластину з електродом з чистого срібла діаметром 3 мм отримали досить стійке значення коефіцієнта переносу (близько 20%). Приріст катоду спочатку зростає, але з часом почав зменшуватися, що можна пояснити зміною теплового балансу на електродах. Ця гіпотеза стверджується і в роботі [25].

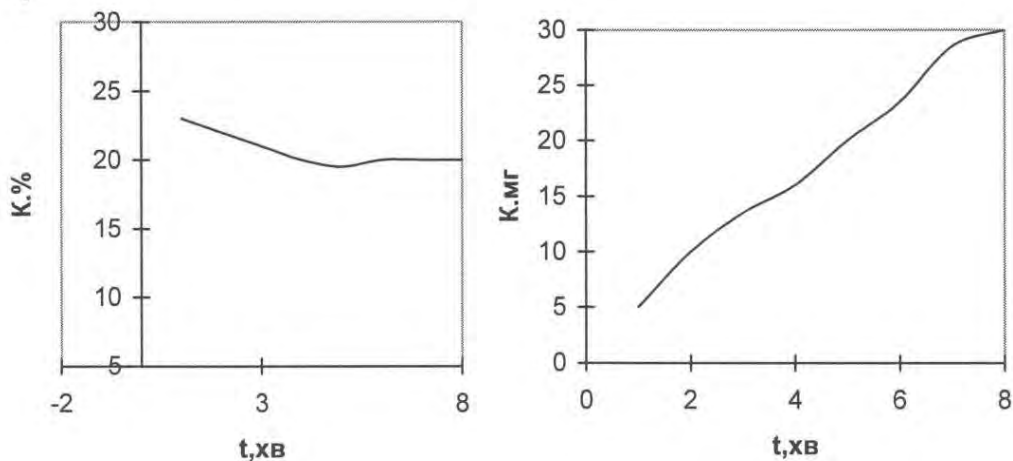


Рисунок 9.3 – Залежність коефіцієнта масопереносу і надрважки катода при III режимі ЕІЛ від часу (на пластині)

При нанесенні покриття на мідну заклепку з нікелевим гальванічним шаром виконано досліді по нанесенню шару срібла. Додатково випробувано електроди з перспективного композиційного матеріалу (КМ) на основі срібла. Досліді показали, що проведення процесу ЕІЛ в умовах: установка “Э-22А”, III режим,  $A = 6,03$  мм – з використанням КМ забезпечує значне підвищення як інтенсивності масопереносу речовини з аноду на катод, так і коефіцієнт переносу (>50%) (рис. 9.4., 9.5).

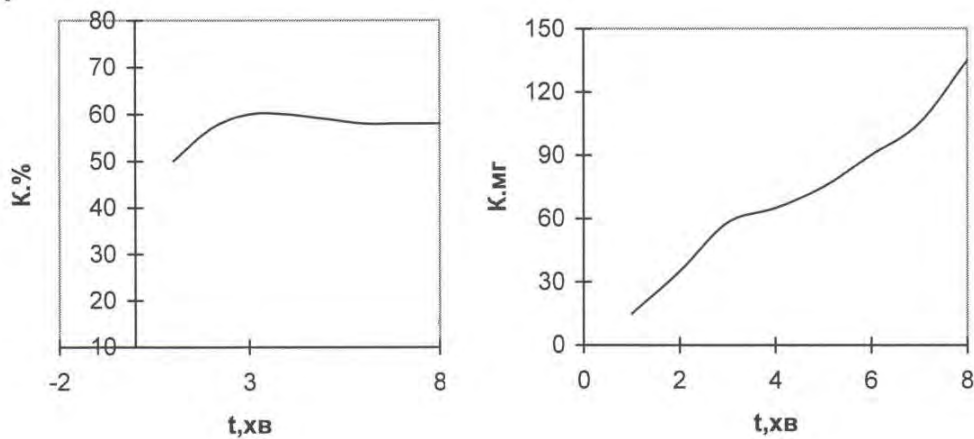


Рисунок 9.4 – Залежність коефіцієнта масопереносу і надважки катода при III режимі ЕІЛ від часу (на заклепці, електрод Ag – 1,3 % С, Ø 3 мм)

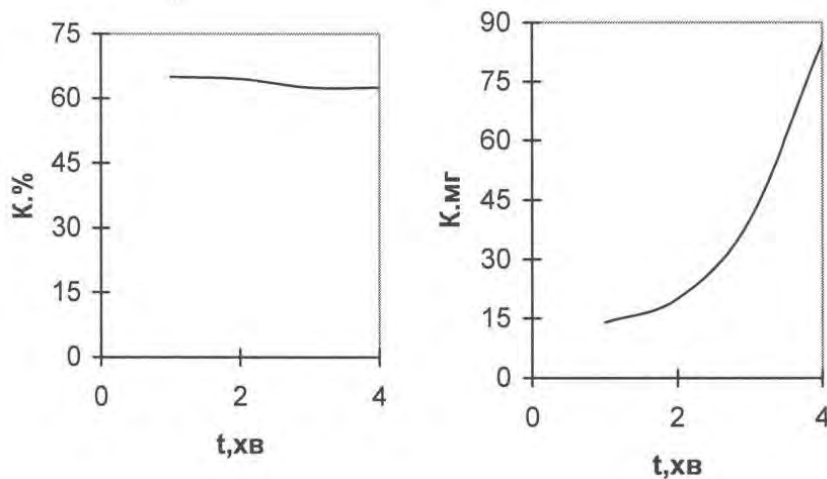


Рисунок 9.5 – Залежність коефіцієнта масопереносу і надважки катода при III режимі ЕІЛ від часу (на заклепці, електрод Ag – 1,3 % С, Ø 3 мм)

## 9.5 Дослідження властивостей контактних вузлів відновлених ЕІЛ

Вплив матеріалу електрода (анода) на приріст катода і ерозію анода вивчали в серії експериментів по нанесенню електроіскрових покриттів із срібла, нікелю і композиційних матеріалів СН-10-10 % Ni), СН-30 (А%-30% Ni). Покриття наносили за допомогою установки при робочій ємності  $C_p = 360$  мкФ. Результати експериментів показано на рис. 9.6. Добавки нікелю до срібла знижують ерозію анода, причому з збільшенням вмісту нікелю ерозія зменшується. Однак, якщо добавка до срібла 30 % нікелю знижує приріст катода в порівнянні з чистим сріблом, то добавка 10 % нікелю підвищує приріст (рис. 9.7). При цьому самий низький коефіцієнт переносу спостерігається у чистого срібла майже у по всьому діапазоні енергії імпульсу. Введення

10 – 30 % нікелю в склад електроду підвищує коефіцієнт переносу в середньому на 10 – 15% (рис. 7.8).

Отримані результати говорять про те, що особливості процесів, які протікають на катоді і аноді ЕІЛ, залежать від складу електродів. Суттєвий вплив на ерозійну стійкість матеріалів здійснюють їх теплофізичні властивості. Так, відомо, що температура поверхні матеріалу при дії плоского джерела тепла обернено пропорційна добутку його теплоємності, густини і коефіцієнта теплопровідності:

$$T_{n1} / T_{п2} = A,2 C_2 p_2 C_i p_i$$

Таким чином, температура поверхні нікелю, що має більш низьке значення коефіцієнта акумуляції тепла  $\epsilon = (\kappa \text{ і } C_2)$  і коефіцієнта температуропровідності в порівнянні з сріблом, буде при різних рівних умовах вище, а глибина проплавлення і відповідно кількості утворених рідкої і пароподібної фаз – нижче, ніж у срібла. Можна уявити, що добавка нікелю до срібла підвищує ерозійну стійкість останнього у відповідності з кількістю введеної добавки, що і підтверджується залежностями, приведеними на рис. 9.6. Однак немонотонний характер залежності приросту катода від складу нікелю у складі анода дає основу говорити про відмінності кількості рідкої фази в продуктах ерозії матеріалів СН-10.

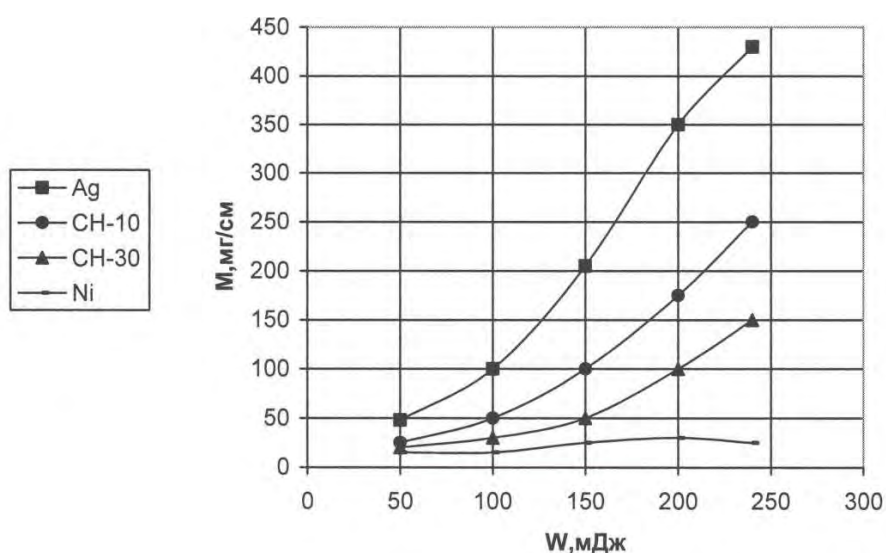


Рисунок 9.6 – Залежності величини ерозії аноду від енергії імпульсу при електроіскровому легуванні

У композиційному срібно-нікелевому матеріалі температура поверхні нікелевих включень повинна перевищувати температуру оточуючої срібної матриці. Це повинно призвести до появи горизонтальних перетоків тепла між включенням і матрицею. Враховуючи суттєву різницю коефіцієнтів

температуропровідності срібла  $1,66 \times 10^{-4} \text{ м/с}$  і нікелю ( $a_{\text{Ni}} = 0,12 \times 10 \text{ м}^2/\text{с}$ ), можна допустити, що горизонтальний перетік тепла, направлений в при поверхневих шарах від включень до матриці, якщо дозволить розмір включення, може з глибиною змінити напрямок. В результаті горизонтальних перетоків тепла між матрицею і включенням в глибину матеріалу буде поступати менша кількість тепла, і сумарний об'єм рідкої фази зменшиться в порівнянні з чистим сріблом. Тим часом деякий об'єм срібної матриці, який оточує нікелеве включення, може розігрітися до температури плавлення раніше решти об'єму. Якщо допустити, що ерозія матеріалу в імпульсному розряді відбувається під впливом електродинамічних і електростатичних сил, які виникають в момент початку розряду, то при введенні в срібну матрицю нікелевої складової ерозія в рідкій фазі може початися раніше, ніж без такої, вносячи свій вклад у підвищення приросту катода. Якщо ж при цьому глибина плавлення зменшиться несуттєво, приріст катода може зрости в порівнянні з металом без добавок, що і спостерігається у випадку матеріалу СН-10 (рис. 9.7). Суттєве зниження сумарного об'єму рідкої фази, яка утворюється на аноді, може понизити приріст катода в порівнянні з металом без добавок, перекриваючи ефект прискорення ерозії, як у випадку використання композиції СН-30.

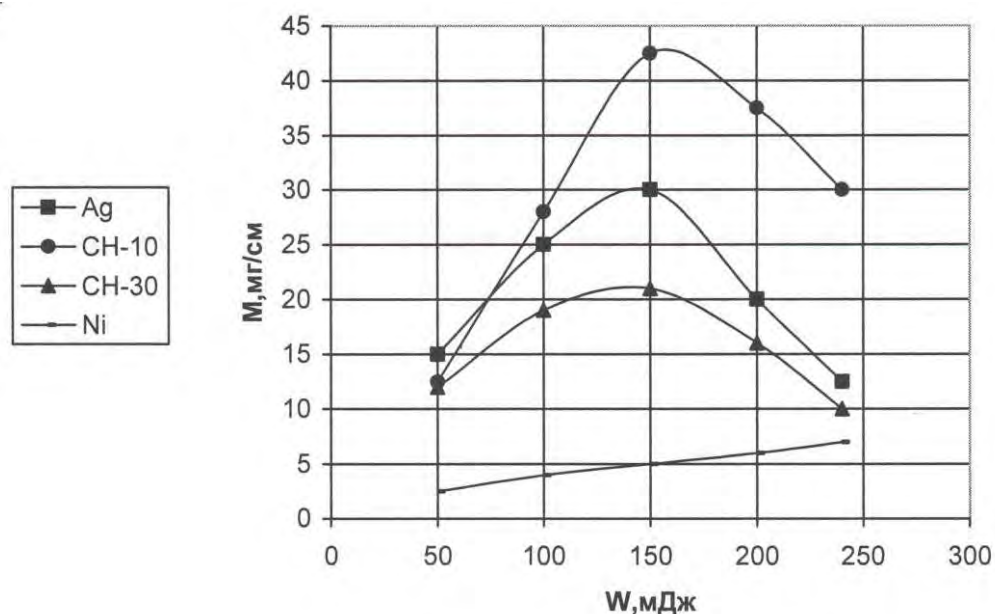


Рисунок 9.7 – Залежності величини приросту катода від енергії імпульсу при електроіскровому легуванні

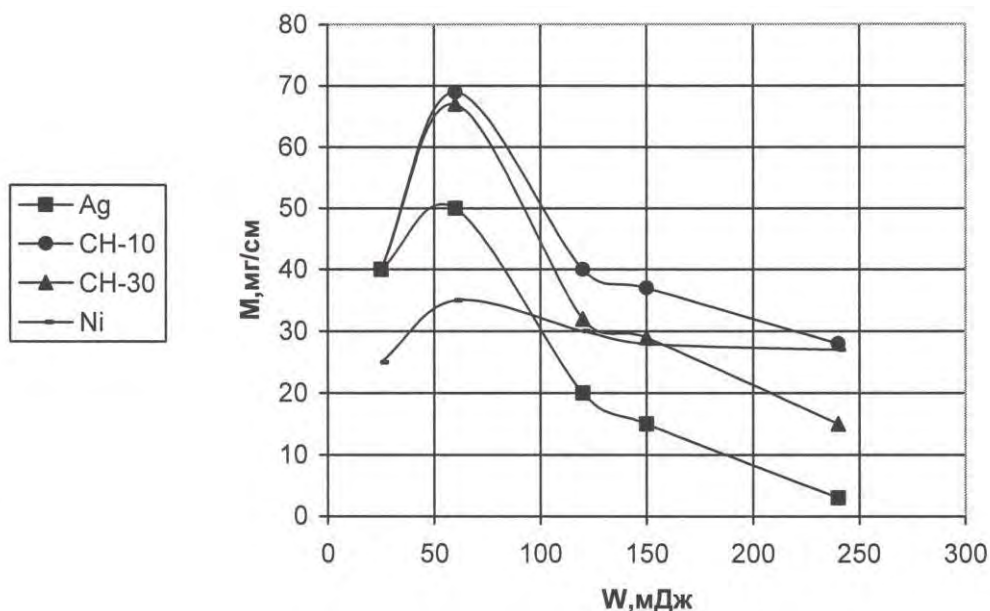


Рисунок 9.8 – Залежності величини коефіцієнта переносу від енергії імпульсу при електроіскровому легуванні

Враховуючи не зміщуваність срібла і нікелю у рідкому стані можна говорити про збереження нікелевими включеннями своїх особливостей від розплавлення матриці і після плавлення останніх. В цьому випадку збільшення вмісту нікелю в складі матриці повинно інтенсифікувати процес випаровування срібла, зменшуючи час досягнення матрицею температури кипіння. Тим же часом більш висока питома теплота пароутворення нікелю в порівнянні з сріблом підвищить витрати енергії на випаровування нікелю, що повинно знизити кількість пароподібної складової в продуктах ерозії композиційного анода. Збільшення коефіцієнта переносу при введенні 10 % нікелю в склад срібної матриці пов'язано з суттєвим збільшенням кількості рідкої фази в продуктах ерозії при незначній інтенсифікації процесів випаровування. Збільшення вмісту нікелю зменшує теплові дві в глибину матеріалу, прискорюючи початок кипіння як срібної матриці, так і нікелевих включень, що може слугувати причиною підвищення частки пароподібної складової в продуктах ерозії анода і відповідного зниження коефіцієнта переносу. Тим часом збільшення затрат енергії на випаровування нікелю знижує кількість пароподібної фази в продуктах ерозії анода, зберігаючи коефіцієнт переносу більшим, ніж у чистого срібла.



## 9.6 Дослідження впливу технологічних параметрів нанесення покриття показників електроерозійної стійкості

Значним фактором в процесі ЕІЛ виступають технологічні характеристики процесу. Для кожної електроіскрової установки характерні свої особливості масопереносу в залежності від технологічного режиму. На установці «Елітрон-22» при максимальному робочому струмі ЕІЛ підкладок з вмістом нікелю 5, 10, 15 % викликає зворотній масоперенос (тобто спостерігається зменшення маси підкладки та зростання маси електрода-анода). Таке явище характерне для електродів з чистих металів як для нікелю, так і для міді. Можливо, цей процес зв'язаний із зворотнім переносом срібної компоненти (у вказаних підкладках при меншій кількості нікелю відповідно більше срібла) в умовах більш високих енергетичних характеристик процесу ЕІЛ. Наявність графіту в матеріалі підкладки також звичайно перешкоджає процесам масопереносу у відповідності з інтенсивним віддувним ефектом з'єднань графіту з киснем в умовах ЕІЛ. При варіюванні вмісту графіту 3 – 5 % по масі більш інтенсивний масоперенос, корелюючий з товщиною покриття; відповідає звичайно меншому вмісту графіту в підкладці, хоча можна спостерігати відхилення від цієї закономірності для електродних матеріалів, що містять добавки сульфідів. Проводячи аналогію з роботою розривних електричних контактів, можна охарактеризувати схильність до зворотного масопереносу, використаних як підкладку. Серед серії матеріалів з різним вмістом нікелю і срібла більш корозієстійкі контактні пари (для умов близьких до ЕІЛ) матеріали, які містять – 50 % нікелю.

У варіанті використання нікелевих покриттів більш ефективним є застосування в якості електродного матеріалу не чистого нікелю. А його композицій, з допомогою яких існує можливість широкого маніпулювання величиною масопереносу на розглянуті в роботі матеріалу підкладки. Вміст нікелю в складі підкладок змінювався від 5 до 50 %. Спираючись на результати масопереносу нікелевих та мідних електродів, а також їх композицій, можна відмітити зростання величини масопереносу у відповідності до росту вмісту нікелю в підкладках, аж до 30 %. При подальшому вмісті нікелю в матеріалі підкладки величини масопереносу знижуються значною мірою.

Встановлено, що на контактах двох типів покриття з срібла порівняно легко можна отримати при всіх режимах легування, що забезпечуються використовуваним обладнанням, характеристики процесу при цьому практично збігаються.

Використання нікелевого електроду, при тих же умовах приводить до формування більш тонких покриттів на легованій поверхні, що пов'язано головним чином з суттєвою різницею в значеннях тиску пари та зволожуючої здатності обох металів. У той же час легування нікелем дослідних контактів має і деякі особливості, що ускладнюють процес при порівнянні з використанням чисто металевих виробів.

В інтервалі значення робочого струму  $I = 0,3 - 0,6$  А зміна маси контакту знаходиться в проміжку масової похибки, але отримані дані з урахуванням результатів мікроструктурних досліджень та вивчення процесу в часі дозволяють виявити діючі в даному випадку основні закономірності.

Так, процес формування нікелевого покриття на досліджуваних контактах відрізняються нестійкістю, обумовленої конкуруючими процесами вигорання вмикачів з поверхні контакту, що забирають з собою деякий об'єм основи контактного матеріалу, та осідання на ній нікелю. Дійсно, візуальні спостереження процесу легування контактів складу Ag-Ni-C свідчать про активні викиди пилоподібних мас, що супроводжують ерозійний процес на катоді і викликають почорніння обох елементів пари, що особливо помітно при більш високих енергетичних параметрах легування ( $I > 0,8$  А). Збагачення поверхні контакту сріблом після видалення з неї основної частини неметалевих домішок зміщує процес у бік формування нікелевого покриття. Однак, зменшення маси тіла контакту продовжується через пори (навіть дуже дрібні) нікелевого шару, який осідає і перешкоджає утворенню зовсім бездефектного шару достатньої товщини.

В табл. 9.4 наведені значення зміни маси контакту з композиції Ag -Ni- C(Дк) та електроду ( $D_a$ ) за 0.5 хв. легування в досліджуваному інтервалі параметрів електроіскрового легування (ЕІЛ), які відображають результати приведених вище спостережень.

Таблиця 9.4

**Зміна  $D_a$  та  $D_k$  при ЕІЛ контактів з композиції Ag-Ni-C електродом ( $t= 0,5$ хв )**

$I_{роб}, A$	“Элитрон-12“		“Элитрон -22“			
	C=200 мкФ		C=200 мкФ		C=360 мкФ	
	$D_a, мг$	$A_k, мг$	$D_a, мг$	$A_k, мг$	$A_a, мг$	$A_k, мг$
0.3	-0.2	+ 0.1	-	-	-	-
0.4	-0.3	0	-0.4	+ 0.2	-	-
0.6	-0.8	-0.2	-0.9	+ 0.1	-0.5	+ 0.2
0.8	-0.7	-0.6	-0.8	-0.9	-0.9	0
1.0	-1.1	-0.9	-1.0	-1.2	-1.0	-0.1

З табл. 9.5 випливає, що ерозія анода закономірно підвищується до  $I = 0,6$  А починаючи від 0,8 А процес вигорання неметалічної фази настільки активізується, що тиск парів летючих оксидів перешкоджає переносу матеріалу електрода на поверхню контакту, внаслідок чого зменшення маси трохи знижується. При цьому процес супроводжується залипанням електрода при малих амплітудах вібрації ( $A = 0,25$  мм). Зміна параметру  $A$  в інтервалі 0,255 – 0,4мм достатньо помітно лише при  $I > 0,8$ А. Дійсно, оскільки залипання пари в цьому режимі супроводжується послідовним відривом металу з поверхні контакту, іскровий розряд діє на включення графіту в нижньолежачому шарі, ініціюючи виникнення мікро вибухів на все нових ділянках.

Таблиця 9.5

Матеріал контакту	Матеріал покриття	Зусилля зрізу, Н
Ag-CuO	Ag	2400
Ag-CuO	Ni	2400
Ag-Ni-C	Ag	1200
Ag-Ni-C	Ni	1200

Виходячи з цього, збільшення амплітуди вібрації знижує інтенсивність залипання, а значить, і величину втрати маси композиції. При цьому нікелеве покриття в цих умовах формується і при  $I = 1$  А, але з великими втратами маси аноду і катоду.

За виключенням відмічених жорстких режимів, в усіх інших випадках вже через – 10 с від початку легування починає превалювати процес осаду нікелю, що підтверджується візуальною металізацією поверхні. Практичне повне перекриття поверхні нікелем на контактах діаметром 6мм проходить за 20 – 30 с; збільшення часу легування мало впливає на ріст товщини покриття, але веде до збільшення втрат маси електрода і контакту.

При ЕІЛ контактів за допомогою установки “Елфа-541“ формуються більш гладкі покриття; приріст і втрати в цьому випадку теж малопомітні навіть при тривалішому легування. Помічено, що зовнішній вид покриття в цьому випадку малочутливий до зміни величини робочого струму в діапазоні 1,6 – 16 А і в більшій мірі залежить від швидкості процесу ( $v$ ) і особливо від ємності: зниження значень  $v$  і  $C$  призводить до збільшення пористості покриття.

Контакти з електроіскровим покриттям нікелем і сріблом були приварені точковою зваркою до лату них контактотримачів. Якість зварювання контролювали зміною зусилля зрізу контактів за стандартною методикою. Результати, отримані для контактів з срібним і нікелевим покриттям,

співпадають для обох типів композицій табл. 7.6. Оскільки при мінімальному зусиллі зрізу для контактів 0,6 мм (1200 Н) контакти складу Ag-Ni-C руйнувались, слід вважати, що реальне значення цієї величини в даному випадку перевищує вказаний рівень.

Таблиця 9.6

**Склад та товщина електроіскрових покриттів**

Склад електрода, що використовується, %		Тривалість легування, хв/см	Товщина покриття (розрахункова), мкм	Склад покриття, %	
Ag	Ni			Ag	Ni
100	-	3	6.1	100	
		10	25.1		
75	25	3	8.2	73.0	27.0
		10	14.6		
50	50	3	3.1	55.5	44.5
		10	6.6		
25	75	10	2.4	24.8	75.2
		10	3.6		
-	100	3	1.5	-	100
		10			

Вивчення мікрошліфів підтверджує високу якість приварювання контактів. Контакти із композиції Ag-Ni-C з електроіскровим нікелевим підшаром були випробувані в автоматичних вимикачах в партії з серійними контактами марки КМК-АЗО. вибірковий контроль мікроструктури контактних вузлів (вертикальний розріз) показав, що в процесі випробувань не погіршується якість кріплення дослідних контактів.

Результати дослідів показали можливість розширення номенклатури електричних контактів з електроіскровими покриттями під зварювання, в тому числі з такими, які не містять срібла, що обумовлює не тільки економію дорогоцінного металу, але й дозволяє підвищити якість щеплення контакту з підкладкою і підвищити надійність роботи електричних апаратів.

Склад покриття визначали з допомогою мікрорентгено-спектрального аналізу шляхом співставлення з еталоном. Результати, приведені в таблиці, свідчать про те, що склад покриття в основному, відповідає складу легуючого електрода.

На основі розглянутих матеріалів можна відмітити, що застосування композиційних електродних матеріалів на основі нікелю дає можливість 2 – 3 рази збільшити масоперенос порівняно з чисто нікелевим електродом, і, як наслідок, товщину нанесеного покриття. У варіанті використання мідних покриттів для всього діапазону складів підкладок можна рекомендувати при формуванні підшару чисто мідний електрод, який дає достатньо стабільний масоперенос для всіх складів контактних композицій-підкладок при низьких значеннях робочого струму. Велика товщина покриття може служити основою більш високої гарантії міцності зварного з'єднання. Хоча основоположною причиною, яка сприяє формуванню зварного з'єднання є звільнення поверхні контакту в результаті випаровування, вигорання, розкладання від добавок компонентів, які перешкоджають пайці.

Крім того позитивним фактором при електроіскровому нанесенні кріпильних покриттів являється формування сприятливої для зварювання морфології покриттів.

Пробні дослідження на зріз контактних вузлів показали, що покриття нанесені на контакти із застосуванням нікелевих, мідних електродів і композицій на їх основі, замість технологічного срібного під шару, дозволяють забезпечувати стабільну високу міцність зварного з'єднання, яка задовольняє технічним умовам.

Застосування електроіскрових покриттів в електроконтактному виробництві дозволяє не тільки отримати значну економію срібла, але й забезпечити високу міцність зварних та паяних з'єднань контактів з контактотримачем.

## **9.7 Дослідження стійкості контактів проти зварювання**

Розроблений метод дослідження для значення стійкості проти зварювання електричних контакт-деталей. В основу методу покладено принцип ініціювання дугового розряду встановленої амплітуди струму і тривалості між зразками, що замикаються, тобто моделює процес зварювання контакту при відкиданні, коли в зазорі виникає дуговий розряд.

Контактний вузол (рис. 9.8) працює наступним чином. У вихідному стані зразки, що випробовуються K1 і K2 закріплені нерухомо з фіксуєчим зазором і утримуються в цьому положенні соленоїдом 2. Зразок встановлюється мікрометричним гвинтом 5. При включенні соленоїда 2 (початок циклу) штанга 1 зі зразком K2 починає переміщуватись під дією пружини 4 до

замкнення зразків. Одночасно з початком руху штанги у зазорі К1 – К2 ініціюється дуговий розряд даної амплітуди струму (форма імпульсу струму – прямокутна). Після замкнення зразків дуга гасне, а через 0,5 мс закінчується імпульс струму.

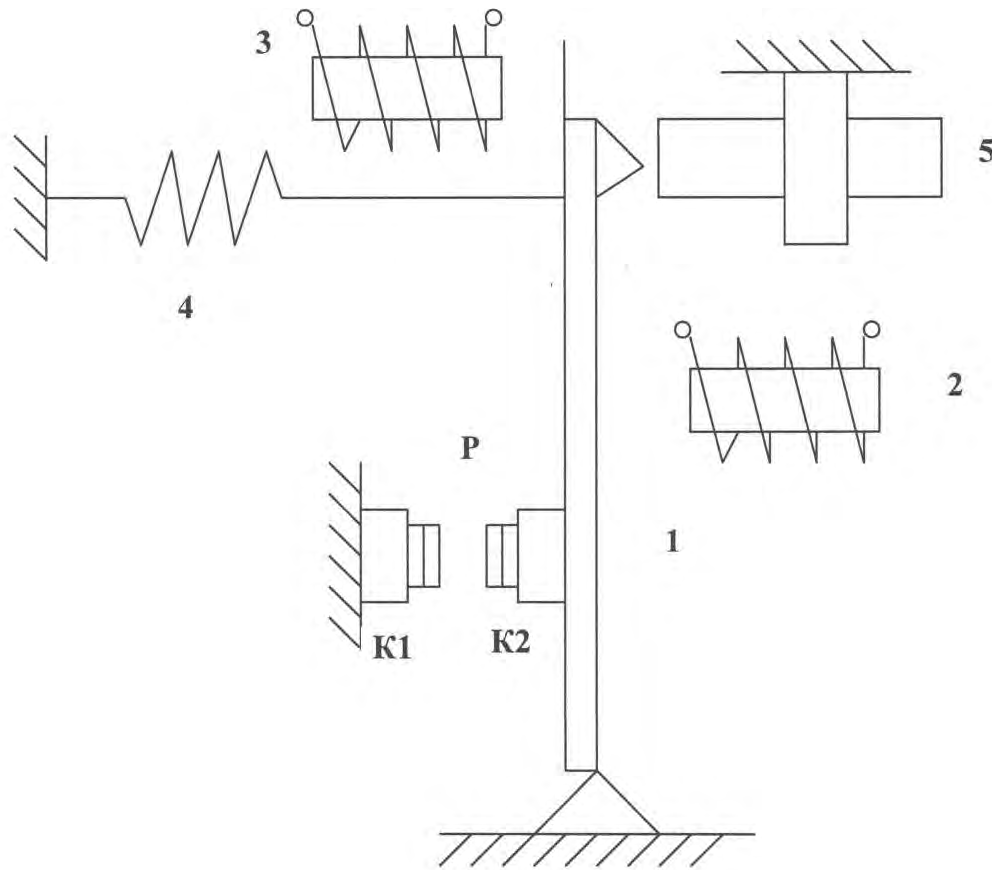


Рисунок 9.8 – Дослідження стійкості контактів проти зварювання

Після замкнення зразків на соленоїд 2 подається струм, який забезпечує мінімальну силу відриву зразків  $P_{\text{тип}}$ , що відповідає обраному критерію зварювання. Якщо сила руйнування зварюваного з'єднання зразків  $P_{\text{св}}$  менше  $P_{\text{тип}}$  то зварювання відсутнє і штанга повертається у вихідне положення, після чого цикл випробування автоматично повторюється у відповідності з заданою програмою. У випадку, якщо  $P_{\text{св}}$  більше  $P_{\text{тип}}$ , на соленоїд 2 подається лінійно зростаючий струм, і по значенню струму у момент руйнування зварювального з'єднання визначають  $P_{\text{св}}$ .

При проведенні випробувань встановлюються наступні параметри: сила контактного натиску при замиканні зразків, зазор між зразками, амплітуда струму у дузі і тривалість дугового розряду. Тривалість дугового розряду (час прольоту зразка К2 до замкнення при обраному зазорі) контролюється по осцилограмі струму через зразки і регулюється за допомогою прискорюючого соленоїда 3. Технічні характеристики стенду наступні:

- зазор контактів встановлюється в діапазоні 0,1 – 2 мм з похибкою 0,01 мм;
- амплітуда струму в дуговому розряді встановлюється з кроком 10 А в діапазоні 10 – 320 А з похибкою не більше 5 %;
- тривалість дугового розряду встановлюється в діапазоні 0,1 – 20 мс з похибкою не більше 5 %;
- контактний натиск встановлюється в діапазоні 0,1 – 10 Н з похибкою не більше 5%;
- сила зварювання зразків вимірюється в діапазоні 0,1 – 25 Н з похибкою до 5 %

Проведені випробування показали, що сила зварювання апроксимується логорифмічним нормальним законом розподілення. Випробування проводились на одній і тій же парі зразків. Після випробувань руйнування робочої поверхні зразків склало 2/3 об'єму. В якості критеріїв зварювання частіше вибирають частоту зварювання ( $P$ ) і середню силу зварювання ( $F_{cv}$ ) визначаються за формулами:

$$P = \frac{n}{N}$$

$$\lg F_{cv} = \frac{\sum_{i=1}^n \lg F_{cvi}}{n}$$

де  $n$  – число зварювань;  $N$  – число циклів випробувань;  $P_{cvi}$  – сила зварювання в  $i$ -тому циклі.

Аналіз результатів випробувань показав, що частота зварювання лінійно зростає зі збільшенням руйнування робочої поверхні зразків. Сила зварювання після перших циклів випробувань для нових зразків (приблизно 30 циклів) стабілізується і практично не залежить від числа циклів і ступенів руйнування зразків. Тому для оцінки: стійкості проти зварювання, в якості рекомендованого критерію зварюваності, прийнята сила зварювання середня за 30 циклів випробувань, хоч визначення частоти зварювання менш складне.

На рис. 9.9 приведені залежності частоти зварювання і сили зварювання ( $P_{cvi}$  від струмів в дуговому розряді для промислових зразків з Cr999.9, КМК-А31, а також КМК-А10м, виготовлених заводом “Електроконтакт“ в 1990 та 2000 рр. режим випробувань: тривалість дуги (час прольоту контакту К2) 6,0 мс; контактний натиск 0,5 Н;  $P_{тип} = 0.1$  Н;  $P$  і  $F_{cv}$  визначається по результатам 30 циклів випробувань для обраної пари зразків. Як витікає з рис. 7.9  $P$  і  $F_{cv}$

зростають зі збільшенням струму в дуговому розряді, що узгоджується з відомими даними.

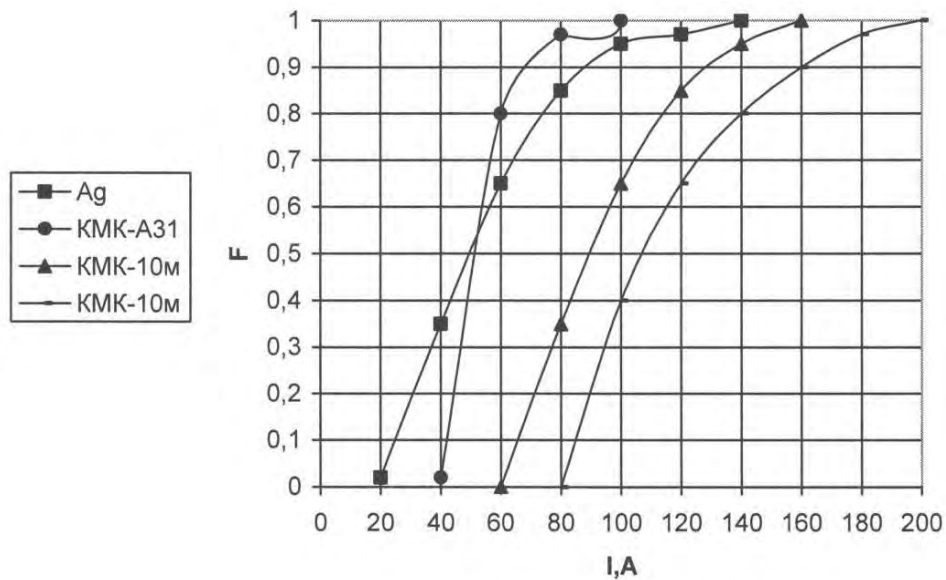


Рисунок 9.9 – Залежність частоти зростання від струму у дуговому розряді

Статистична обробка експериментальних результатів показала, що довірчий інтервал при визначенні  $F_{cv}$  по 30 циклам випробувань, при 90 % вірогідності результатів, склав до 15 % для зразків із  $Sr999,9$  і до 30 % для зразків з КМК-А31 і КМК-А10м та при необхідності може бути зменшений за рахунок збільшення кількості циклів випробувань.

В цілому, аналіз результатів, отриманих нами на протязі ряду років для порошкових і великої номенклатури литих контакт-деталей, показав, що даний метод має високу продуктивність, чим вигідно відрізняється від методик на базі модельних реле.

## 9.8 Дослідження надійності відновлених апаратів

Випробування на надійність повинні проводити відповідно до вимог і методів, встановлених в стандартах на конкретні види апаратів. Параметри напруги (частота коливань / у кілогерцах і коефіцієнт перевищення амплітуди), що відновлюється, в основному визначаються власною частотою і загасанням коливань в ланцюзі навантаження відповідно до рис. 9.10 і не залежать від напруги, що встановлена і його частоти. Враховуючи це, контроль параметрів напруги випробувального контура, що відновлюється, здійснюється шляхом осцилографування напруги на кожній фазі за умови, що навантаження в решті фаз сполучені паралельно. На графічному листі 3 приведена схема вимірювання



на фазі 1 ланцюга; схема вимірювання на решті фаз 2 і 3 аналогічні. Резистори  $R_2$  і конденсатори  $C$  повинні бути підібрані так, щоб забезпечувалася наступна рівність:

$$f = 2000 \cdot I_c^{0.2} \cdot U_e^{0.8} \pm 10\%,$$

де  $I_c$  – струм, що відключається (або що включається), А

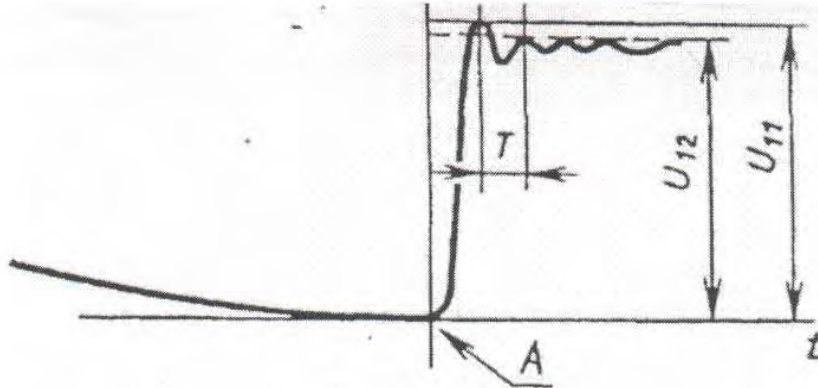


Рисунок 9.10 – Залежність напруги відносно власної частоти і загасання коливань в ланцюзі навантаження

При вимірюванні джерело живлення відключають. Заземляють тільки точку, вказану на схемі. Збудження ланцюга котушки проводиться від генератора  $O$  синусоїдальної напруги через діод і практично без індуктивний резистор  $Я_3$ . Ланцюг відключається діодом при проходженні струму через нуль, а коливання напруги відновлюються (рис. 9.10), що реєструються на екрані електронного осцилографа, розгортку якого слід синхронізувати з частотою генератора.

Напруга генератора повинна бути не вище за номінальну напругу діода УБ. Час відновлення зворотного опору діода повинен бути не більше 4 с.

Частота генератора вибирається залежно від струму, комутованого в контурі: 2 кГц – при струмах відключення до 1000 А; 4 кГц – при струмах відключення понад 1000 А.

Завдяки високій частоті генератора, ланцюг навантаження при контролі є практично повністю індуктивним, і у момент проходження струму через нуль напруга, матиме пікове значення  $U_n$ . Дотична до кривої напруги в початковій точці А (рис. 9.10) повинна проходити практично горизонтально. Коефіцієнт перевищення амплітуди  $u$  визначається як відношення напруги  $U_n$  і  $U_{12}$ , а частота визначається як зворотна величина коливань  $T$  встановленої напруги.

Допускається застосовувати інші методи визначення параметрів напруги, що встановлюється, наприклад при подачі в ланцюг навантаження струму прямокутної форми.

Допускається випробування апаратів трифазного струму при наскрізному струмі протягом заданого часу проводити однофазним струмом при послідовному з'єднанні всіх полюсів апарату.

Якщо апарат призначений для експлуатації при змінному і постійному струмі і номінальний струм головного ланцюга однаковий для змінного і для постійного струму, то випробування, проведені на змінному струмі, слід вважати дійсними і для постійного струму.

Допускається випробувувати апарати постійного струму при змінному струмі, в режимі, встановленому в стандартах на конкретні види апаратів.

Випробування слід проводити при наскрізному струмі протягом заданого часу або при піковому значенні наскрізного струму, встановлених в стандартах на конкретні види апаратів. Переважним є випробування при протіканні крізного струму на протягом 1 с з і пікового значення наскрізного струму протягом однієї півхвили змінного струму частоти  $(50 \pm 12,5)$  Гц. При випробуванні протягом 1 с із струм повинен вимірюватися його дійсним значенням, що діє, протягом цього часу, а при випробуванні однією півхвилею його амплітудним значенням.

При необхідності випробування слід проводити струмом, пікове значення якого рівне заданому, з подальшим спадом до меншого значення і протіканням його протягом заданого часу, відповідно до встановленого в стандартах на конкретні види апаратів.

Випробування на стійкість при допустимому наскрізному струмі і на стійкість при піковому значенні допустимого наскрізного струму можуть проводитися роздільно. Випробування апарату протягом 1 с з, а також при заданому піковому значенні наскрізного струму слід проводити один раз.

Якщо тривалість випробувань  $t$  не рівна 1 с, то слід пропускати струм  $I$ , дійсне значення якого, таке що вираз не менш встановленого в стандартах на конкретні види апаратів, але не перевищувало його більш ніж 10 %. Тривалість випробування в таких випадках повинна бути не більше 5 с.

Апарат вважається таким, що витримав випробування, якщо не відбулося мимовільного відключення і появи ефектів, небезпечних для обслуговуючого персоналу, а також відбулося зварювання контактів або пошкодження апарату, що перешкоджають його подальшій нормальній роботі.

## 9.9 Випробування на механічну та комутаційну зносостійкість

При випробуванні апарату на зносостійкість слід виконувати такі вимоги:

1) перед і під час випробування повинне проводитися змащення частин, що труться.

2) апарати з ручним приводом допускається випробовувати як уручну, так і за допомогою спеціальних пристосувань, достатньо точно відтворюючих умови при операції уручну.

3) апарати з руховим приводом, що працює від джерела електричної енергії і стислого повітря, а також апарати з незалежним розчіплювачем, повинні випробовуватися при: певному роді струму, номінальній частоті (при змінному струмі), номінальних значеннях напруги ланцюга управління і тиску стислого повітря з граничним відхиленням  $\pm 5\%$ .

4) включення і відключення апарату при випробуванні повинні проводитися кожним з передбачених для цього видів приводів або роздільників. Число циклів операції повинне відповідати встановленим в стандартах на конкретні види апаратів.

5) до, після і під час випробування, через певне число циклів, відповідно до встановленого в стандартах на конкретні види апаратів або програмі випробувань, слід контролювати параметри, що впливають на роботу апарату (наприклад, натиснення, зазори, провали і сумарна товщина контактів, брязкіт контактів, величини переміщень рухомих частин, параметри спрацьовування), які можуть змінюватися в процесі випробування.

6) при випробуванні апаратів допускається звичайне технічне обслуговування, як наприклад, регулювання ходу і контактних натиснень, очищення апарату без розбирання від пилу, кіптяви, в терміни, передбачені стандартами на конкретні види апаратів. Заміна деталей на запасні не допускається, якщо це не передбачене в стандартах на конкретні види апаратів.

7) кількість комутаційних циклів при випробуванні апарату слід визначати лічильником циклів або по числу комутаційних циклів в одиницю часу, помноженому на тривалість випробування, або простим рахунком.

8) допускається проводити випробування на механічну і комутаційну зносостійкість прискореними методами, якщо це встановлено в стандартах на конкретні види апаратів. При випробуванні на механічну зносостійкість допускається враховувати число відпрацьованих комутаційних циклів при попередніх випробуваннях.

9) випробування на механічну зносостійкість слід проводити при частоті комутаційних циклів, встановлених в стандартах на конкретні види апаратів. Для скорочення тривалості випробувань допускається вибирати максимально можливу частоту, при якій:

- апарат працює чітко;
- не відбувається неприпустимого нагріву котушок і інших його частин;
- після включення і відключення рухома частина встигає прийти в стан спокою.

У апаратів з рухомим приводом, що працює від джерел електричної енергії або стислого повітря, тривалість подачі живлення в ланцюг управління повинна бути більше часу спрацьовування апарату. Допускається застосовувати штучне охолодження рухомого приводу. Для контролю стану елементів комутаційного контактного апарату і фіксації відмов під час випробування на механічну зносостійкість допускається пропускати через контакти струм відповідно до встановленого в стандартах на конкретні види апаратів.

Випробування на комутаційну зносостійкість слід проводити в режимі випробування (частота комутації в . ч , напруга, струм, постійна часу або коефіцієнт потужності при включенні і відключенні, напруга, що відновлюється) відповідно до вимог стандартів на конкретні види апаратів. Час протікання струму після кожного включення повинен бути не менше часу брязкоту контактів при включенні. Перевірка апаратів на комутаційну зносостійкість повинна проводитися по випробувальних схемах, для наступних випадків випробувань: -одно- і двополюсних апаратів категорій застосування АС-1, АС-22, ДС-3, ДС-5, ДС-22, ДС-23:

- допоміжних контактів категорій застосування АС-11 і ДС-11 – триполюсних апаратів категорій застосування АС-1, АС-2, АС-22, АС-23, АС-4
- триполюсних апаратів категорій застосування АС-3 одно- і – двополюсних апаратів категорій застосування ДС-2 і ДС-4 випробувальні схеми складаються з джерела живлення, ланцюга навантаження, допоміжних апаратів і випробовуваного апарату.

Випробовуваний апарат повинен бути включений між джерелом енергії і навантаженням.

Для набуття заданих значень струму, постійною часу або коефіцієнта потужності випробувального ланцюга послідовно з випробовуваним апаратом слід включати регульовані індуктивне і активне навантаження, згідно вимогам При застосуванні в схемі котушок індуктивності без магнітопровода

навантаження можуть бути шунтовані резистором, що забирає струм, значення якого встановлене в стандартах на конкретні види апаратів.

Апарат вважається таким, що витримав випробування, якщо він відповідає вимогам по зносостійкості, встановленим в стандартах на конкретні види апаратів.

## 10 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ВІДНОВЛЕНИХ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

### 10.1 Дослідження впливу характеру навантаження (активний, активно- індуктивний) на електроерозійну стійкість відновлених контакт-деталей

Надійність електричного контакту здебільшого, визначається його складовими компонентами, структурою і властивостями поверхневих шарів, які утворюються в результаті ерозії і переносу контактного матеріалу в електричній дузі [21, 97]. При комутації змінного струму постійно змінюється полярність протікання струму через контакт і за експериментальними даними встановлено негативний (тобто зменшення маси) коефіцієнт інтенсивності електричної ерозії у нерухомих контакт-деталей (1, 2, 3, 4, 5, 6) і в рухомих (мостики 1-2, 3-4, 5-6). Але рухомі контакт-деталі зношуються інтенсивніше на 10-27%. Це явище характерне для контактів змінного струму і його можна пояснити, на нашу думку тим, що при випробуваннях температура рухомих мостиків була вища, ніж температура нерухомих контактів, на величину 25 – 30 °С. Маса рухомого контакту мостикового типу зменшується трохи більше, ніж маса нерухомих контактів, тому що процеси при дуговій ерозії супроводжуються інтенсивнішим випаровуванням і розбризкуванням матеріалу контакт-деталі з більш високою температурою.

За результатами досліджень побудовані залежності електроерозійного зносу напилених контакт-деталей пускачів ПМЛ із різних контактних матеріалів (рис. 10.1 і 10.2).

З наведених рисунків видно, що зі збільшенням комутуючого струму ерозійний знос збільшується і досягає свого максимального значення при струмі 10А. Обумовлюється це тим, що із збільшенням струму в контактних процесах більш значну роль відіграють фактори плазмової дуги і збільшується дуговий ерозійний знос за рахунок зростання енергії електричної дуги. Причому на дугову ерозію суттєво впливає фазовий склад і структура контактного матеріалу, тому що дуговий канал закріплюється на структурних складових з низькою тепло- і електропровідністю.

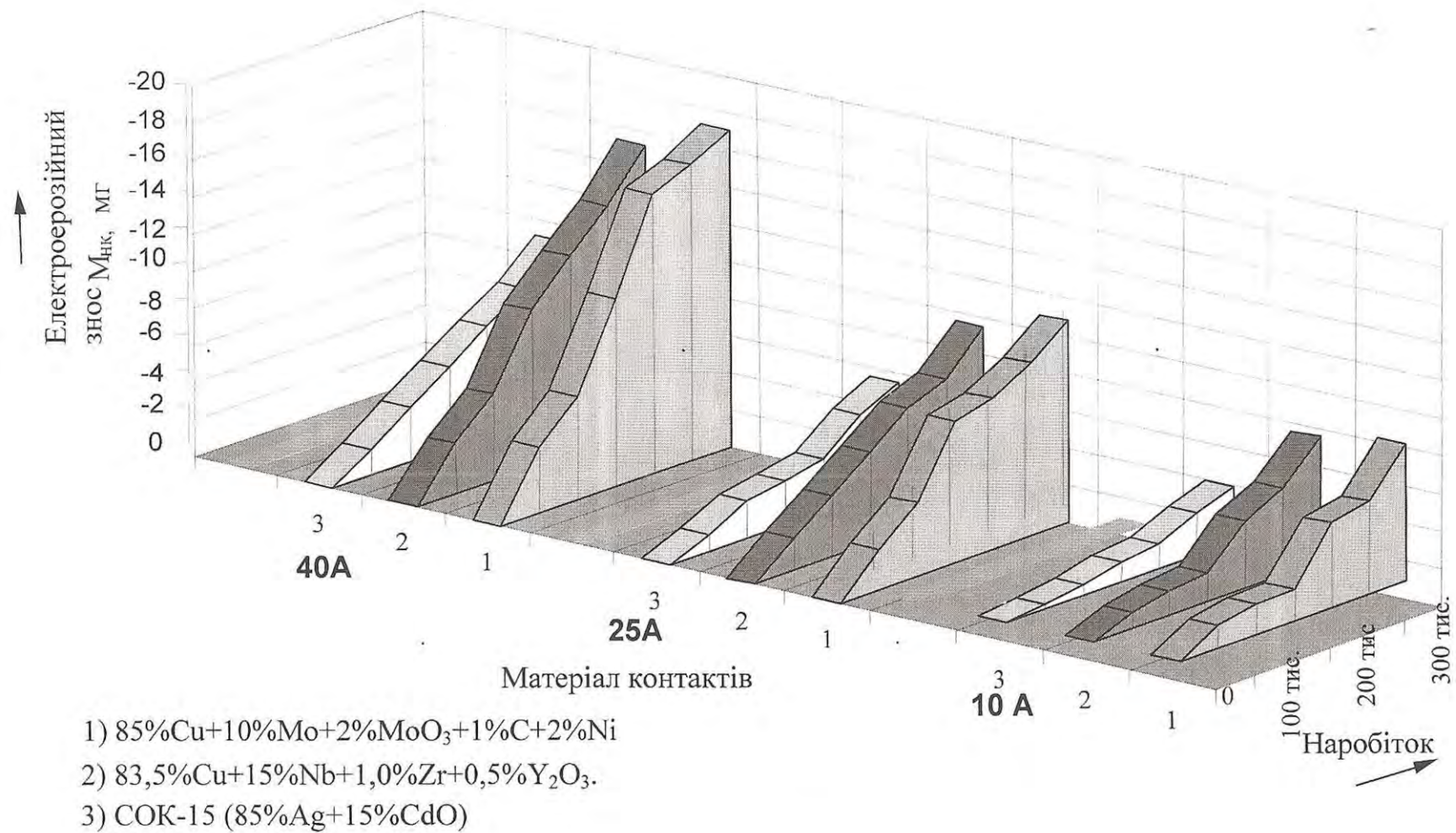


Рисунок 10.1 – Залежність електроерозійного зносу напилених нерухомих контакт-деталей пускача ПМЛ-3200\*04. Категорія застосування АС-3. Струми комутації  $I_k=10; 25; 40$  А.

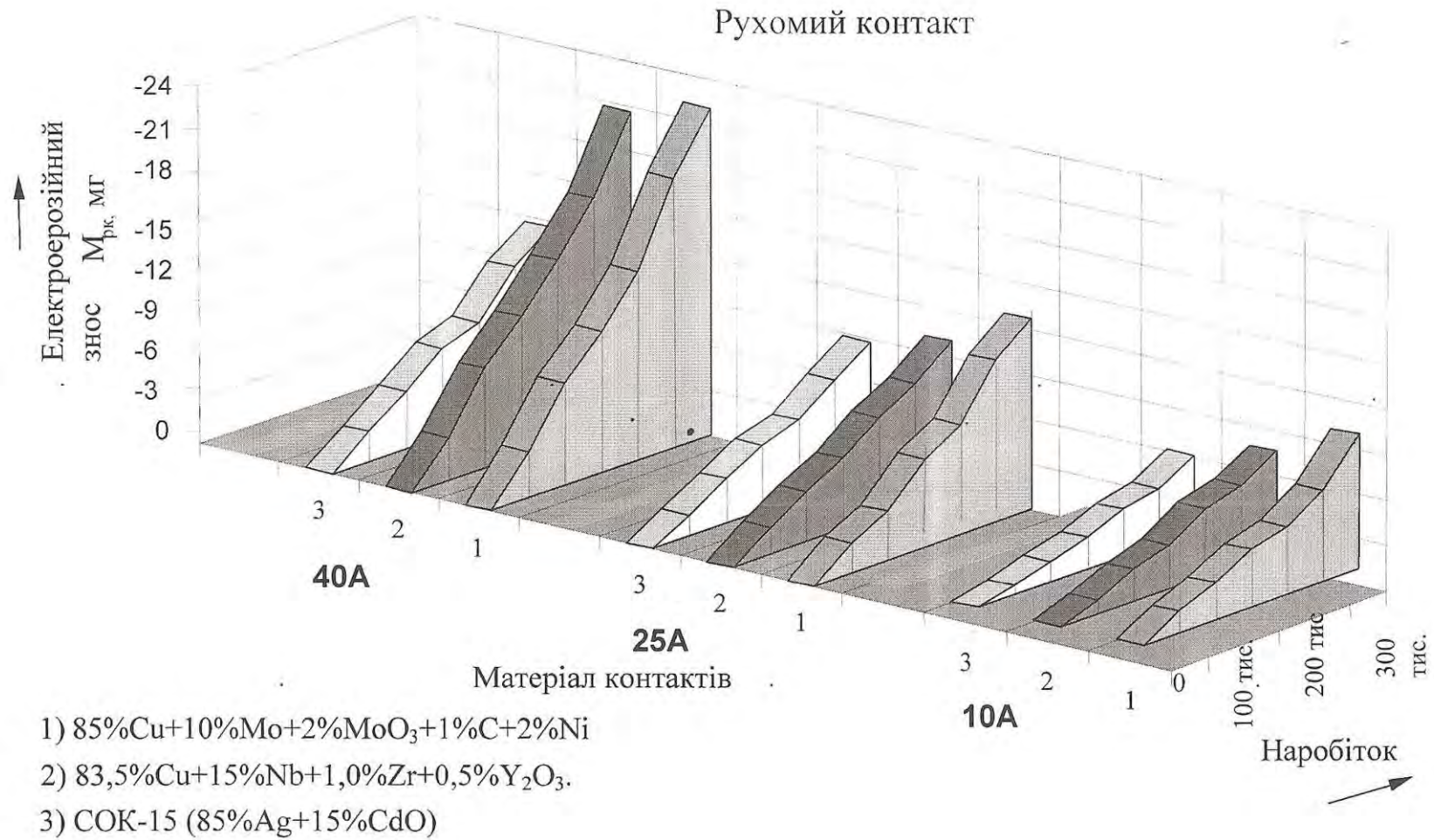


Рисунок 10.2 – Залежність електроерозійного зносу напилених рухомих контакт-деталей (мостиків) пускачів ПМЛ-3200.04. Категорія застосування АС-3. Струми комутації  $I_k=10; 25; 40\text{A}$ .



Найбільшою ерозійною стійкістю володіють контакти КМК-А10м (пускач ПМЛ 4200.В). Стійкість матеріалу КМК-А10м вища на 13-30%, ніж контактів із латуні Л62 і на 35 – 45 % вища, ніж в контакт-деталей з матеріалу  $85\%Cu+10\%Mo+2\%MoO_3+1\%C+2\%Ni$ . Висока електроерозійна стійкість контактів КМК-А10м в наших дослідженнях досягається структурою матеріалу і особливостями оксиду кадмію CdO. Так дуга горить в атмосфері парів кадмію та кисню, потенціал іонізації яких вище, ніж парів Ag. Потенціал однократної іонізації атомів Ag – 7,54В, Cd – 8,96В, O – 13,55В. Оскільки, дуга горить в парах Cd і O, то вона гасне швидше, ніж в парах Ag. Осадок оксиду кадмію, який утворився внаслідок зворотної реакції окислення парів кадмію в області більш низьких температур, осідає на контактах, перешкоджає їх зварюванню при замиканні, не порушуючи при цьому провідності.

Децо нижча електроерозійна стійкість у контакт-деталей з матеріалу  $83,5\%Cu+15\%Nb+1,0\%Zr+0,5\%Y_2O_3$ . Цей матеріал забезпечує невелику тривалість горіння електричної дуги, має гарні робочі характеристики, але, на жаль, володіє низькою теплостійкістю. Це призводить до обгорання, розплавлення і зварювання контактів при високих електричних навантаженнях. Зношування відбувається по всій поверхні контакт-деталі рівномірно. Суттєвим недоліком цього матеріалу є ще недостатня тривкість проти сульфідної корозії.

Термічна дія дуги викликає випаровування і розбризкування матеріалу контактів, поверхні контакт-деталей окислюються. В процесі роботи можливі суттєві зміни в поверхневому шарі. На поверхні контактів утворюються оксиди срібла, міді, нікелю. Оксиди срібла мають невелику електричну провідність, яка близька до провідності чистого срібла, але оксид срібла, який утворився при термічній дії дуги, відрізняється від  $Ag_2O$ , який утворюється в статичному режимі. Оксид міді, скупчений в окремих точках, здатний збільшити перехідний опір протягом невеликого часу в декілька разів.

Таким чином, найбільшою ерозійною стійкістю володіють контакти КМК-А10м пускач ПМЛ-2100.В). Стійкість матеріалу КМК-А10м вища на 15 – 25 %, ніж контактів із матеріалу  $85\%Cu+10\%Mo+2\%MoO_3+1\%C+2\%Ni$  та на 35 – 40 % вища, ніж у контакт-деталей з латуні Л62. Висока електроерозійна стійкість контактів КМК-А10м в наших дослідженнях досягається структурою матеріалу і особливостями оксиду кадмію CdO.

## 10.2 Дослідження параметрів електричної дуги (сила струму, час горіння дуги) при комутації струму відновленими контакт-деталлями

При випробуваннях на комутаційну здатність та електроерозійну стійкість було зафіксовано визначені параметри комутації (час горіння дуги і середнє значення струму в дузі), при цьому використовували осцилографування струму та напруги. Величина струму визначається по падінні напруги на шунті 75ШСМЗ-25-05. Осцилограми струму і напруги отримували за допомогою універсального двохпроменевого запам'ятовуючого осцилографу С8-14. Похибка виміряних величин не перевищує 5%. Схема приєднання осцилографа до випробувального електричного кола наведена на рис. 10.3.

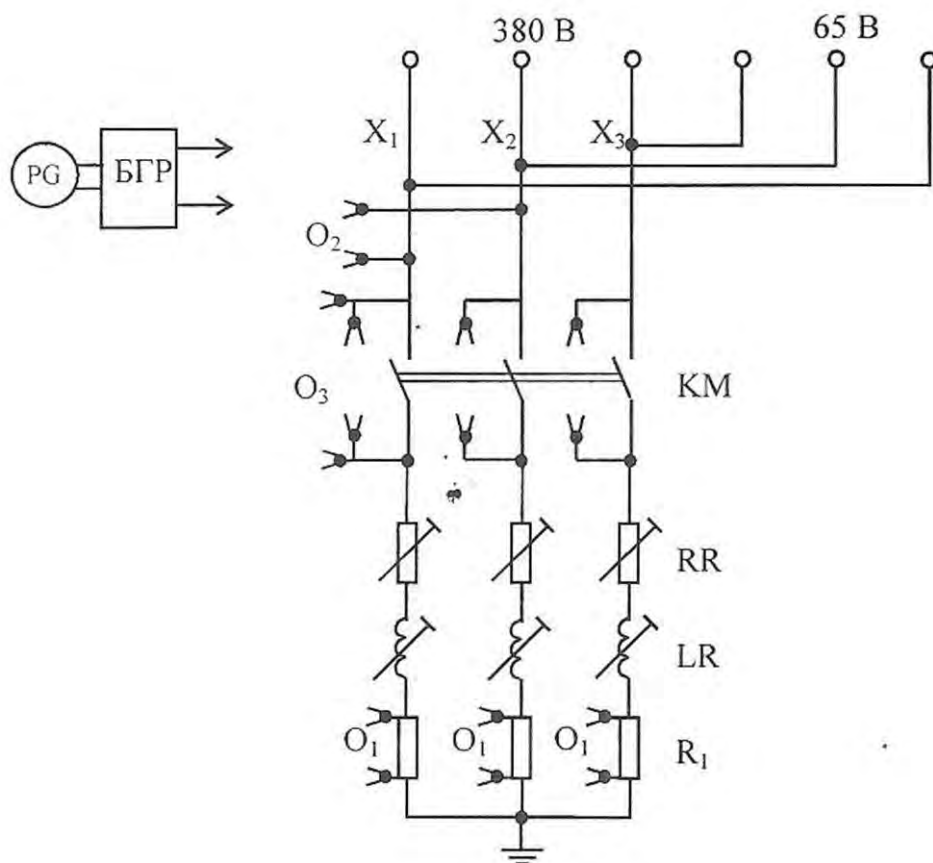


Рисунок 10.3 – Схема приєднання осцилографа С8-14 до випробувального електричного кола:

$O_1$  – канал осцилографа для запису струму;  $O_2, O_3$  - канали осцилографа для запису напруги; PG – осцилограф;  $R_1$  – шунт; RR – регульовальні резистори; LR – регульовальні котушки індуктивності; БГР – блок гальванічної розв'язки

При комутації змінного струму з кожним переходом струму через нуль в момент виникнення струму різко зростає напруга на дузі до напруги

запалювання дуги  $U_3$ . За напівперіод горіння дуги напруга на ній змінюється незначно. В низьковольтних електроустановках при другому на півперіоді горіння дуги її опір значно зростає, що призводить до підвищення її відновлювальної міцності. Після другого переходу струму через нуль дуга руйнується і згасає. Після цього міжконтактний проміжок може ще зберігати залишкову провідність, яка відповідає тій чи іншій стадії дугового розряду. Тому представлені осцилограми досліджених напилених контакт-деталей електромагнітних пускачів ПМЛ-3200 на постійному струмі, оскільки він більш інформативний.

Раціональною умовою гасіння дуги змінного струму при напилених контакт-деталях в пусках ПМЛ-3200 слід вважати комутацію, при якій дуга гасне в першій після розмикання контактів перехід струму через нуль. Наочно це ілюструється на рисунку 8.6. Встановлено що, час горіння електричної дуги при розмиканні контактів у серійних пусках ПМЛ-3200 0x4 В, складає 75 мс, а в пусках з дослідними контакт-деталлями – 55 мс (рис. 10.4).

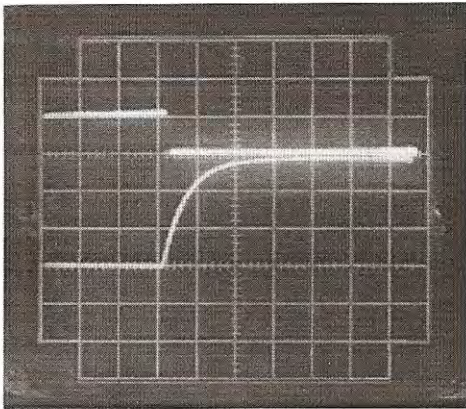
### **10.3 Розроблення спеціалізованих стендів для дослідження електричної ерозії та перехідного опору контакт-деталей електричних апаратів напругою до 1000 В**

Надійність роботи магнітних пускачів в основному визначається роботою їх контактів під час експлуатації. Найбільший вплив на надійність роботи контактів справляють наступні фактори: сила струму комутації, напруга на котушці, характер навантаження, відносна вологість і концентрація сірководню.

Для визначення впливу сили струму, характеру навантажень, напруги на електроерозійну стійкість контактів з різними фізико-механічними властивостями була розроблена і виготовлена установка. Установка дозволяла випробовувати контакти головного кола магнітних пускачів на комутаційну зносостійкість в категорії застосування АС-3, згідно ДСТУ 2993-95.

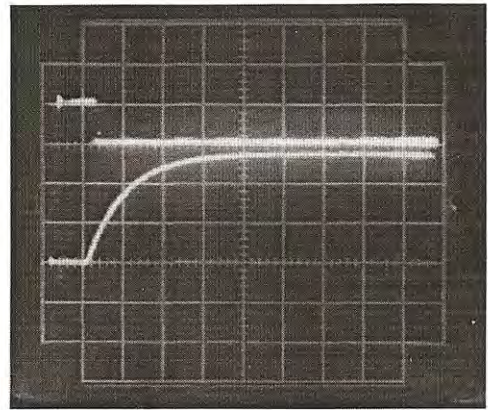
На рис. 10.5 приведені електрична схема силової частини і схема керування установки.

Матеріал КМК – 10м

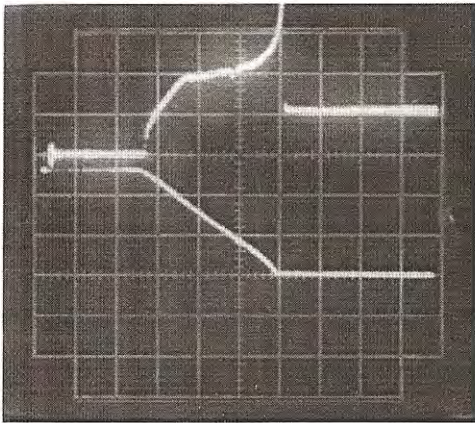


№1. Вмикання:  $U=65\text{В}$ ;  $I=40\text{А}$ ;  $\tau=2\text{мс}$ ;  $L=28\text{мГн}$   
( $m_i=50\text{ мс/под.}$ ;  $m_u=50\text{V/под.}$ ;  $m_i=0,02\text{V/под.}$ )

Матеріал 81,3%Cu+10%Cr+

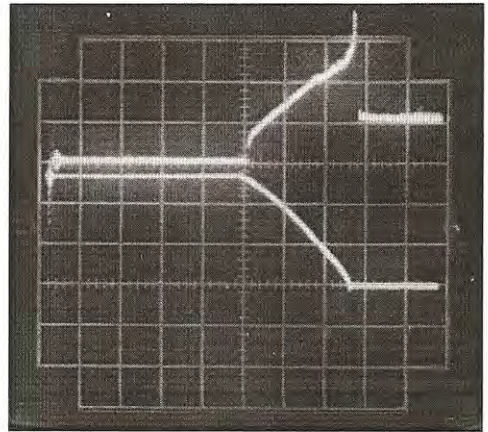


№2. Вмикання:  $U=65\text{В}$ ;  $I=40\text{А}$ ;  $\tau=10\text{мс}$ ;  $L=77\text{мГн}$   
( $m_i=20\text{ мс/под.}$ ;  $m_u=50\text{V/под.}$ ;  $m_i=0,05\text{V/под.}$ )



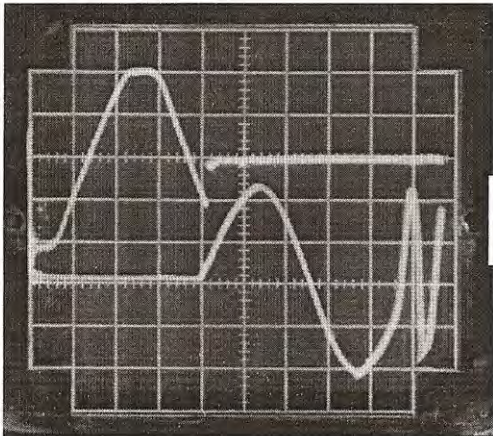
№3. Розмикання:  $U=65\text{В}$ ;  $I=40\text{А}$ ;  $\tau=40\text{мс}$ ;  $L=240\text{мГн}$   
( $m_i=20\text{ мс/под.}$ ;  $m_u=50\text{V/под.}$ ;  $m_i=0,05\text{V/под.}$ )

Постійний струм



№4. Розмикання:  $U=65\text{В}$ ;  $I=40\text{А}$ ;  $\tau=40\text{мс}$ ;  $L=240\text{мГн}$   
( $m_i=20\text{ мс/под.}$ ;  $m_u=50\text{V/под.}$ ;  $m_i=0,05\text{V/под.}$ )

КМК-10м



Змінний струм

КМК-10м

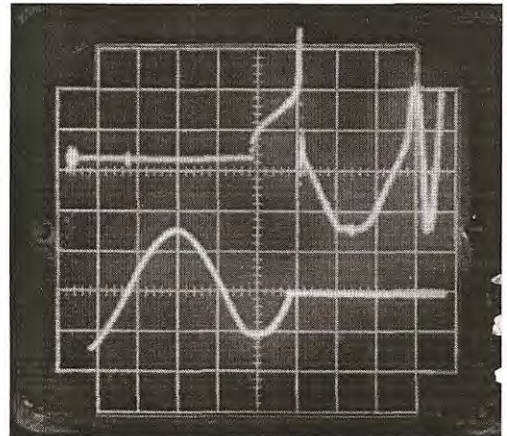


Рисунок 10.4 – Осцилограми електричної дуги в електромагнітних пускачах ПМЛ – 3200

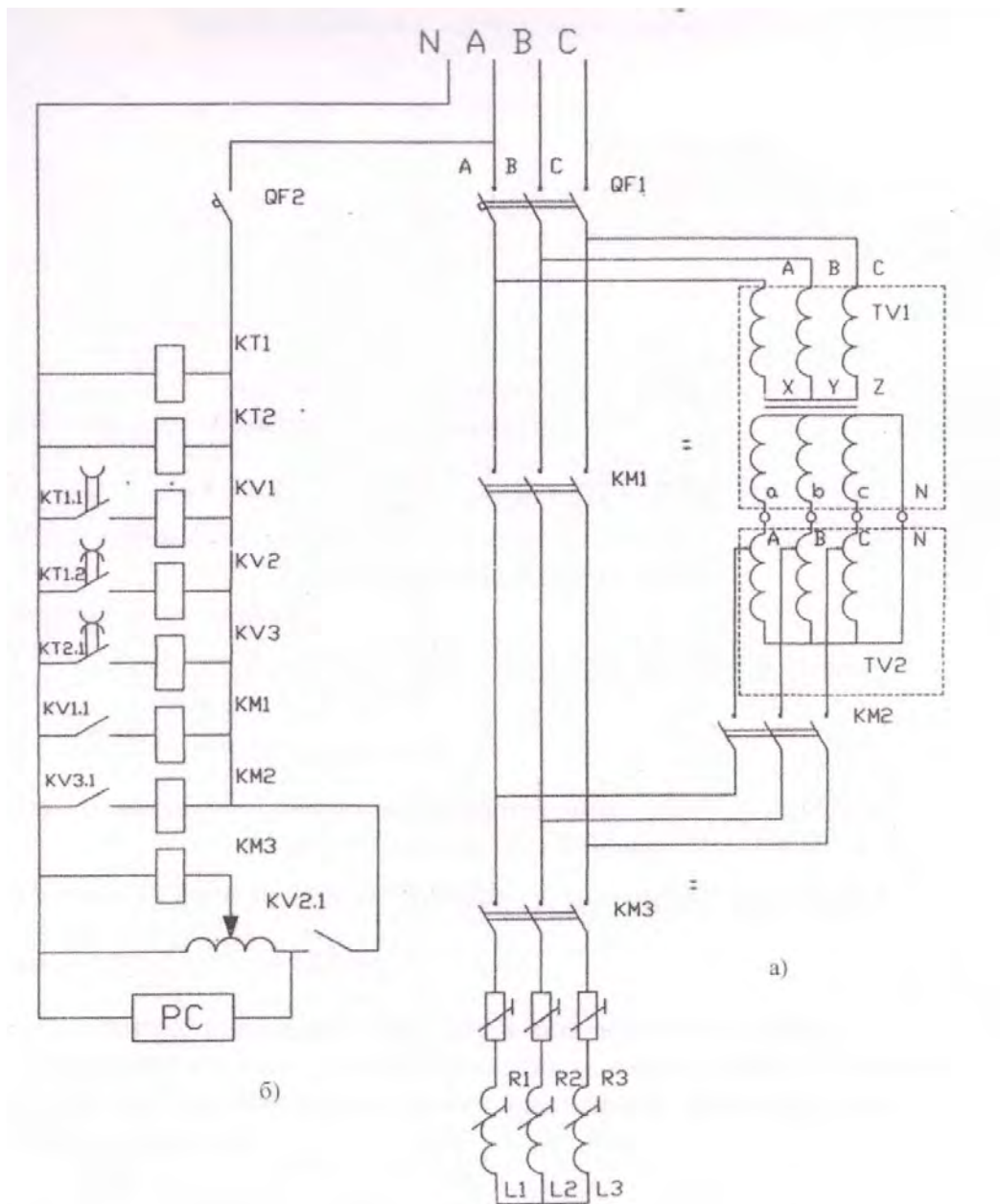


Рисунок 10.5 – Принципова електрична схема установки:  
а – силової частини; б – схема керування

В силову схему установки входять автоматичні вимикачі СЯ1 типу ВА 88-35 і GF2 типу ВА 88-32, трифазний автотрансформатор регулювання напруги РНТ-220-12, допоміжні електромагнітні пускачі КМ1 і КМ2 типу ПМЛ-3100, випробувальний пускач КМ3 типу ПМЛ-3100, котушки індуктивності і активні опори, які імітують обмотки електродвигуна.

В схему керування входять автоматичний вимикач СГЗ типу ВА47-29, електронні реле часу КТ1 і КТ2 типу ВЛ-159М-2, проміжні електромагнітні реле КУ1-КУ3 типу ПЗ-41 і котушки електромагнітних пускачів КМ1-КМ3.

Випробувальний електромагнітний пускач КМЗ під'єднаний до силових виходів допоміжних пускачів КМ1 і КМ2, а своїми силовими виходами пофазно з'єднаний з резисторами 111-113 і котушками індуктивності.

Вхід електромагнітного пускача КМ1 через автоматичний вимикач з'єднаний з електромережею змінного струму напругою 380 В.

Вхід електромагнітного пускача КМ2 з'єднаний з вивідними кінцями обмоток автотрансформатора, а ввідні кінці його обмоток через автоматичний вимикач QF2 з електромережею змінного струму напругою 220 В.

Включення силової схеми в робочий режим здійснюється автоматичними вимикачами (QF1 і QF2, а схеми керування – автоматичним вимикачем в електромережу змінного струму напругою 220 В.

Електронні реле часу КТ1 і КТ2 регулюють час протікання пускового струму – час протікання номінального струму, час паузи команди на протікання струму через котушки проміжних Івектромагнітних реле КУ1-КУ3.

При подачі змінного струму напругою 220 В на котушку електронного часу КТ1, його нормально замкнуті контакти КТ1.1 подають струм на катушку проміжного реле КУ1.1 через які струм поступає на котушку КМ1 допоміжного пускача, який під'єднується до вивідних контактів тематичного вимикача QF1.

Протягом 10 мс замикаються контакти реле часу КТ1.2, через які проходить струм на котушку проміжного електромагнітного реле КV2, яка замикає нормально розімкнуті контакти КV2.1. Внаслідок цього котушка випробувального електромагнітного пускача КМЗ отримує струм і замикає його силові контакти, які під'єднують електромагнітний пускач КМЗ до вивідних контактів допоміжного пускача КМ1.

Контакти пускача КМЗ замикають пусковий струм з силою 240 А, час протікання якого складає  $72,85 \cdot 10^{-3}$  с. Після цього контакти КТ1.1 реле часу КТ1, відключають допоміжний пускач КМ1 від автоматичного пускача (QF1 через електромагнітне проміжне реле КV1.

В подальшому контакти КТ2.1 реле часу КТ2 замикаються і подають струм на котушку проміжного реле КУ3, яка замикає контакти КУ3.1 і подає струм на котушку допоміжного пускача КМ2. Контакти допоміжного пускача КМ2 замикаються і під'єднують його до обмоток автотрансформатора TV1.

Так як допоміжний пускач КМ2 з'єднаний з випробувальним пускачем КМЗ, контакти якого замкнені, то до навантаження надходить номінальний струм з силою 40 А при напрузі 63 В.

Через 0,3771 с контакти КТ1.2 розмикаються, котушка проміжного реле КV2 втрачає живлення, розмикаються контакти КV2.1, знеструмлюючи

катушку КМЗ і контакти випробувального пускача КМЗ розмикаються, комутуючи при цьому номінальний струм з силою 40 А, що відповідає ДСТУ 2993-95.

Час паузи складає 2,55 с.

**Розрахунок навантаження при випробовуванні магнітного пускача ПМЛ-3100.04 А в категорії застосування АС-3**

$$U_{\text{НОМ}} = 380 \text{ В}, I_{\text{НОМ}} = 40 \text{ А}$$

**При вмиканні**  $U_{\text{НОМ}} = 380 \text{ В}, I_{\text{П}} = 6 \cdot I_{\text{НОМ}} = 6 \cdot 40 = 240 \text{ А}, \cos\varphi = 0,35$

**При вимиканні**  $U_{\text{НОМ}} = 0,17 \cdot U_{\text{НОМ}} = 0,17 \cdot 380 = 64 \text{ В}, I_{\text{ВИМ}} = I_{\text{НОМ}} = 40 \text{ А}, \cos\varphi = 0,35$

Частота комутації  $\varphi_{\kappa} = 1200$  циклів на годину.

Відносна тривалість вмикання ПВ = 15 %.

**Визначасмо параметри навантаження**

Повний опір кола навантаження кожної фази:

$$Z_n = \frac{U_{\phi}}{I} = \frac{U_{\lambda}}{\sqrt{3} \cdot 240} = \frac{380}{1.73 \cdot 240} = \frac{380}{415.2} = 0.912 \text{ Ом}, \quad (10.1)$$

Активний опір навантаження:

$$R = Z_n \cdot \cos\varphi = 0.915 \cdot 0.35 = 0.32 \text{ Ом}, \quad (10.2)$$

Визначення індуктивності:

$$L = \frac{Z_n \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{2\pi\varphi} = \frac{0,915 \sqrt{1 - 0,35^2}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = \frac{0,915 \sqrt{1 - 0,1225}}{314} = \frac{0,915 \cdot 0,9367}{314} = \frac{0,8570}{314} = 2,73 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 2,73 \text{ мГн}. \quad (10.3)$$

Розрахунок допустимої потужності навантаження і перерізу проводів:

$$P_{\text{дон}} = I_{\text{н}}^2 \cdot R = 40^2 \cdot 0.32 = 512 \text{ Вт}. \quad (10.4)$$

Переріз мідного проводу (при допустимій густині струму  $j_{\text{дон}} = 3 \text{ А/мм}^2$ ).

дорівнює  $S = \frac{I_{\text{н}}}{J_{\text{дон}}} = \frac{40}{3} = 13,3 \text{ мм}^2$ .

### Розрахунок часових параметрів випробувального циклу.

Розрахунок ведеться із умов обмеження теплового навантаження на обладнання, яке не повинно бути більше допустимого значення за час випробувального циклу:

$$\int_0^{t_y} i^2 dt = I_n^2 \cdot t_1 = I_n^2 \cdot t_1 + I_n^2 \cdot t_2 \text{ Вт.} \quad (10.5)$$

Час  $t_1, t_2$  знаходимо наступним чином:

$$ПВ = 15\% = \frac{t_1 + t_2}{t_y} \cdot 100; \quad 0,15 = \frac{t_1 + t_2}{t_y} \cdot 100; \quad t_2 = 0,15t_y - t_1 \quad (10.6)$$

$$I_n^2 \cdot t_y = I_n^2 \cdot t_1 + I_n^2 \cdot t_2 = 36I_n^2 \cdot t_1 + I_n^2(0,15t_y - t_1) = 36I_n^2 \cdot t_1 + I_n^2 \cdot 0,15t_y - I_n^2 \cdot t_1 \quad (10.7)$$

$$I_n^2 \cdot t_y = 35I_n^2 \cdot t_1 + I_n^2 \cdot 0,15t_y$$

$$t_y = 35t_1 + 0,15t_y; \quad 0,85t_y = 35t_1$$

Розраховуємо часовий параметр випробувального циклу

$$\tau_{\max} = \frac{1}{1200 \frac{\text{ЦИКЛ}}{\text{ГОД}}} = \frac{3600}{1200} = 3 \text{ с.} \quad (10.8)$$

Розраховуємо часовий параметр  $t_1$  пускового струму:

$$0,85 \cdot 3 = 35t_1 \quad t_1 = \frac{3 \cdot 0,85}{35} = \frac{2,55}{35} = 72,85 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 72,85 \text{ мс} \quad (10.9)$$

Розраховуємо часовий параметр  $t_2$ , протікання номінального струму:

$$t_2 = 0,15t_y - t_1 = 0,15 \cdot 3 - t_1 = 0,45 - 0,07285 = 0,37715 \text{ с.} \quad (10.10)$$

Розраховуємо часовий параметр паузи  $t_n$ , між випробувальними циклами:

$$t_n = t_y - t_1 - t_2 = 3 - 0,07285 - 0,37715 = 2,55 \text{ с.} \quad (10.11)$$

### Режим, що відповідає категорії застосування АС-4

Номінальна робоча напруга  $U_{\text{НОМ}} = 380 \text{ В}$ ,  $\varphi = 50$

Номінальний робочий струм  $I_{\text{н.р}} = 40 \text{ А}$

$$I_{\text{п}} = 6 \cdot I_{\text{НОМ}} = 6 \cdot 40 = 240 \text{ А, } \cos\varphi = 0,35$$

Частота комутації  $\varphi_k = 600$  циклів на 1 годину.

Відносна тривалість вмикання ПВ = 15 %.



## 10.4 Обґрунтування вибору складу контактного матеріалу з виключенням із нього токсичного оксиду кадмію

Самими перспективними матеріалами з точки зору досягнення ефекту підвищення службових характеристик є композиційні матеріали.

Відсутність чи обмежена взаємодія компонентів дозволяє повністю реалізувати властивості кожного із складових, які вводяться з метою дії на повні службові характеристики виробів.

Найбільш розповсюджені композиції Ag-CdO, Ag-CuO, Ag-C,

Існують науково обґрунтовані принципи структуроутворення матеріалів. Ці принципи виходять із вимог існування гетеро фазної структури, в якій в електро- і теплопровідній основі матричного матеріалу розташовані не взаємодіючі з матеріалом домішки термодинамічних стабільних фаз з відмінними від матричного матеріалу теплофізичними і механічними властивостями.

Встановлено, що в композиціях, які утримують вкраплені в матрицю частини менш теплопровідні ніж матриця, опорна пляма дуги зміщується по поверхні контакту, поражаючи найменш теплопровідні частини. Вибірковість ерозійного руйнування поверхонь контактів дозволяє цілеспрямовано конструювати контактний матеріал, підбираючи компоненти композицій, кращим чином забезпечуючи тепловідвід від зони ерозійної дії, стійкість проти високотемпературного окислення, механічну міцність, високу електропровідність.

Так як 25 % світового виробництва срібла витрачається на потреби електроніки і електротехніки, причому 70 – 80 % його вигорає під дією електричної дуги, а Україна не володіє достатніми сировинними ресурсами, стає ясним в необхідності створення матеріалів, які не вміщують срібло і, в той же час, мають функціональні характеристики контактів на необхідному рівні.

В останні роки широке застосування, як контактний матеріал для апаратів напругою до 1000 В, набули композиції з кількістю оксиду олова 8, 10, 12 %.

З однієї сторони, це обумовлено збільшенням жорстких вимог до екологічної чистоти використовуваних в електротехніці матеріалів, з другої підвищенням рівня та розширенням номенклатури контакт-деталей, виготовлених із композицій срібло-оксид олова з домішками.

Широке застосування набули контакт-деталі марок КМК-А10м, які володіють високою здатністю до дугогасіння, стабільністю перехідного опору, високою електроерозійною стійкістю та низькою силою зварювання.

Високі дугогасильні властивості обумовлені низькою температурою плавлення оксиду кадмію - 900 °С, що нижче температури плавлення срібла 960 °С.

Основним недоліком оксиду кадмію є його токсичність і по існуючій ! фікації за ступенем впливу на організм людини він відноситься першого класу небезпечності [ГОСТ 12.1.005.88].

В дані роботі приводяться результати досліджень електроерозійної стійкості нового композиційного матеріалу:

82 % Ag- 11,5 % - SnO<sub>2</sub> - 4 % In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 2 % Zr - 0,5 % WO<sub>3</sub>

Матеріал виготовлений методами порошкової металургії з внутрішнім окисленням.

Введення 11,5 % мас. оксиду олова (SnO<sub>2</sub>) в композиційний матеріал на: нові срібла внутрішнім окисленням, дозволило створити високу стійкість до мостикової і дугової електричної ерозії.

Це досягається за рахунок високої температури плавлення SnO<sub>2</sub> – 1900 °С та утворення дрібнодисперсної мікроструктури, твердість якої становить Н<sub>В</sub>=150 кг/мм, що в 2,5 рази вище, ніж в серійних контакт-деталях серії КМК-А 10 м.

Добавки оксиду вольфраму (WO<sub>3</sub>), що вводяться в матеріал змочують і обволікають тверді частинки SnO<sub>2</sub>, так як температура плавлення WO<sub>3</sub> – 1470 °С, внаслідок чого тверді частинки SnO<sub>2</sub> знаходяться в завислому стані в рідкій масі срібла, що розплавилась під дією електричної дуги. Підвищення в'язкості і створення волокнистості розплавленого срібла, за рахунок суспензії твердих частинок SnO<sub>2</sub>, зменшує його розбризування і випаровування, що в цілому підвищує зносостійкість матеріалу.

Введення оксиду індію прискорює дифузію олова в внутрішні шари срібла при виготовленні композиційного матеріалу, що приводить до рівномірного розподілу частинок олова по всьому об'єму матеріалу. Це створює дрібнодисперсну структуру, яка підвищує міцність і твердість матеріалу.

Цирконій, що вводиться в матеріал, підвищує корозійну і електроерозійну стійкість матеріалу за рахунок поглинання кисню із розплавленої зони срібла при дії електричної дуги, внаслідок чого скорочується час горіння дуги, зменшується розбризування та випаровування срібла. Перехідний опір у серійного і дослідного матеріалів однаковий і складає 0,7 мОм. Сила приварювання контакт-деталей при струмі 100 А в дослідних контакт-деталях склала 0,02 Н, а в срібних – 0,05 Н.

Розроблений матеріал характеризується високим ступенем екологічної безпеки і електроерозійною стійкістю і рекомендується для заміни серійних КМК-А10м.

### 10.5 Дослідження електроерозійної стійкості контактного матеріалу в залежності від складу і фізико-механічних властивостей інгредієнтів

В даній роботі приводяться результати досліджень електроерозійної стійкості нового композиційного матеріалу в залежності від кількості інгредієнтів і їх фізико-механічних властивостей.

На рис. 10.6 приведена електрична ерозія серійних і дослідних зразків контакт-деталей магнітного пускача ПМЛ-3121 в залежності від числа циклів і кількості інгредієнтів. Комутація струму становила 40 А, напруга 380 В в категорії застосування АС-3.

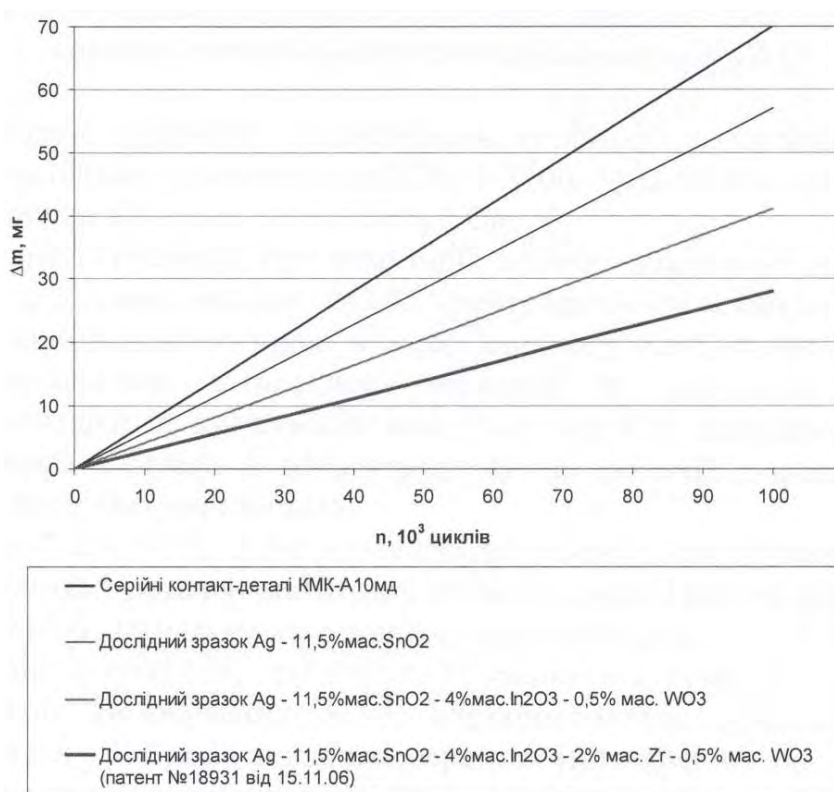


Рисунок 10.6 – Електрична ерозія серійних і дослідних зразків контакт-деталей магнітного пускача ПМЛ-3121Б залежно від числа циклів комутацій

Серійна пара контактів типу КМК-АЮм має знос за  $100 \cdot 10^3$  циклів комутацій 70 мг.

Введення 11,5 % мас. оксиду олова ( $8\text{PbO}_2$ ) в срібну матрицю внутрішнім окисленням дозволило знизити електричну ерозію за 100 тисяч циклів комутацій на 12 мг.

Це досягається за рахунок високої температури плавлення  $8\text{PbO}_2$  –  $1900\text{ }^\circ\text{C}$  та утворення дрібнодисперсної структури, твердість якої становить  $H_v = 150\text{ кг/мм}^2$ , що в 2,5 рази вище, ніж в серійних контакт-деталях серії КМК- А10м.

Основний недолік оксиду олова полягає в тому, що при довготривалому проходженні струму через замкнені контакт-деталі на їх робочих поверхнях утворюється термостабільний шар оксиду олова з високим питомим опором ( $\rho = 4 \cdot 10^4\text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), що призводить до перегрівання контактів та зниження їх електроерозійної стійкості.

Запобігання утворенню термостабільного шару забезпечує введення оксиду вольфраму в кількості 0,5 % мас. Це дозволило знизити електричну ерозію на 29 мг в порівнянні з серійними контакт-деталлями КМК- АЮм.

Розплавлені частинки ( $T_{\text{пл}} = 1470\text{ }^\circ\text{C}$ ) обволікають тверді частинки  $8\text{PbO}_2$  і утворюють волокнистість розплавленого срібла, де волокнами є частинки  $8\text{PbO}_2$ , покриті  $\text{WO}_3$ .

Частинки  $8\text{PbO}_2$ , які не покриті виштовхуються наверх розплавленим сріблом, де на робочій поверхні створюється термостабільний шар оксиду олова з високим питомим опором.

Введення оксиду індію ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) дозволяє рівномірно розподіляти частинки оксиду олова в срібній матриці по всьому об'єму і прискорювати дифузію олова в срібло при виготовленні контактного матеріалу.

Введення цирконію знижує електричну ерозію на 39 мг в порівнянні з серійними контакт-деталлями КМК-АЮм.

Це досягається за рахунок поглинання кисню із розплавленого срібла при дії електричної дуги, що призводить до зменшення часу горіння дуги та розбризкування рідкого срібла.

## **10.6 Дослідження електроерозійної стійкості серійних і дослідних зразків контакт-деталей в магнітних пускачах серії ПМЛ**

Результати ерозійних випробувань серійних і дослідних контакт-деталей в магнітних пускачах серії ПМЛ-3100 04А, ПМЛ-3110 04Б, ПМЛ- 3110 04В приведені на рис. 10.7. а, б, в.

Як видно із графіків, при комутації змінного струму 40 А, напрузі 380 В, в категорії застосування АС-3, електроерозійна стійкість дослідних контакт-деталей в 1,6 разів вища, ніж серійних типу КМК-АЮм.

Це досягається позитивним впливом на контактні властивості матеріалу інгредієнтів, які сумісно вводяться в срібну матрицю, створенням нових хімічних з'єднань і мікроструктури на робочій поверхні контакт-деталей під дією електричної дуги.

На рис. 10.7 а, б, в приведені результати випробувань серійних і дослідних контакт-деталей магнітних пускачів серії ПМЛ-4100 04А, ПМЛ-4110 04Б, ПМЛ-4110 04В на комутаційну зносостійкість.

Як видно із графіків, при комутації змінного струму 63 А, напрузі 380 В, в категорії застосування АС-3, електроерозійна стійкість дослідних контакт-деталей в 1,8 разів вища, ніж серійних типу КМК-АІОм.

Порівняно з пускачами серії ПМЛ-3100 04А, електроерозійна стійкість дослідних контакт-деталей на 0,2 рази вища в пусках серії ПМЛ-4100 04А. Це досягається за рахунок високої термостабільності оксиду олова, внаслідок чого зона плавлення електричною дугою менша і в'язкість розплавленого металу вища.

На рис. 10.8 а, б, в приведені результати випробувань серійних і дослідних контакт-деталей магнітних пускачів серії ПМЛ-4160ДМ0\*4А, ПМЛ-4220Д0\*4Б, ПМЛ-4220Д0\*4В на комутаційну зносостійкість.

Як видно із графіків, при комутації змінного струму 80 А, напрузі 380 В, в категорії застосування АС-3, електроерозійна стійкість дослідних контакт-деталей в 2 рази вища, ніж серійних типу КМК-АІОм.

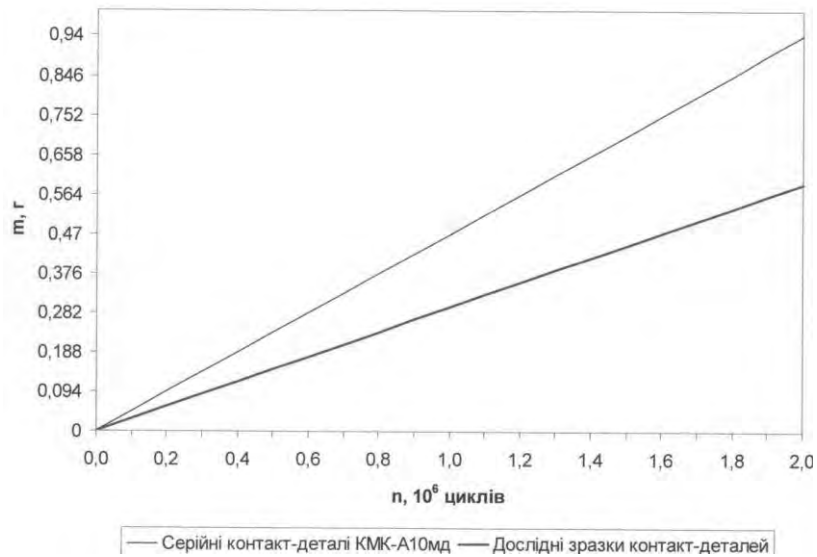
Висока електроерозійна стійкість дослідного матеріалу 82% Ag - 11,5% при комутації струму 80 А проявляється в стабілізуючій дії оксиду олова на розплавлену зону поверхні контакту електричною дугою.

Температура кипіння оксиду олова становить 2273 °С, близьку до температури кипіння срібла 2200 °С.

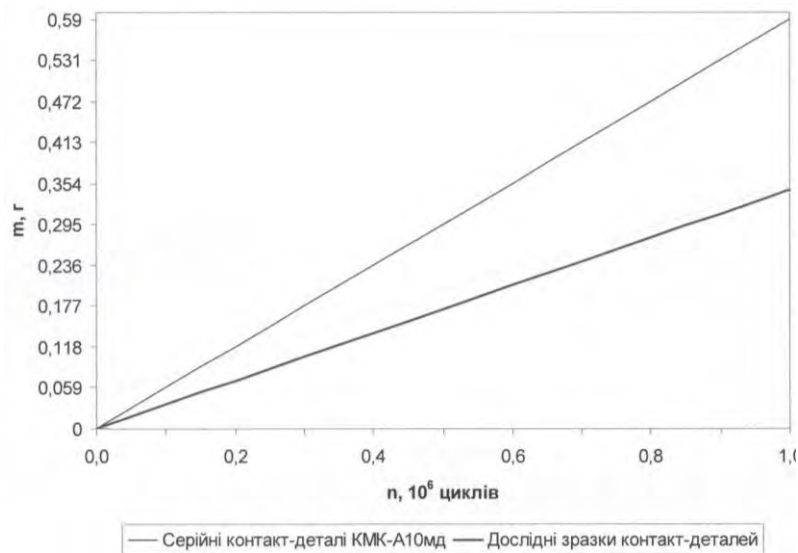
Стабілізуюча дія оксиду кадмію проявляється в меншій степені, оскільки оксид кадмію сублімує при 900 °С, що нижче температури плавлення срібла – 960 °С.

Зона плавлення поверхні контакту дугою менша, в'язкість розплавленого матеріалу вища завдяки більш високій термостабільності оксиду олова. Висока в'язкість розплавленого матеріалу пояснюється більш високою волокнистістю розплавленого срібла, яке має в суспензії тверді частинки оксиду олова.

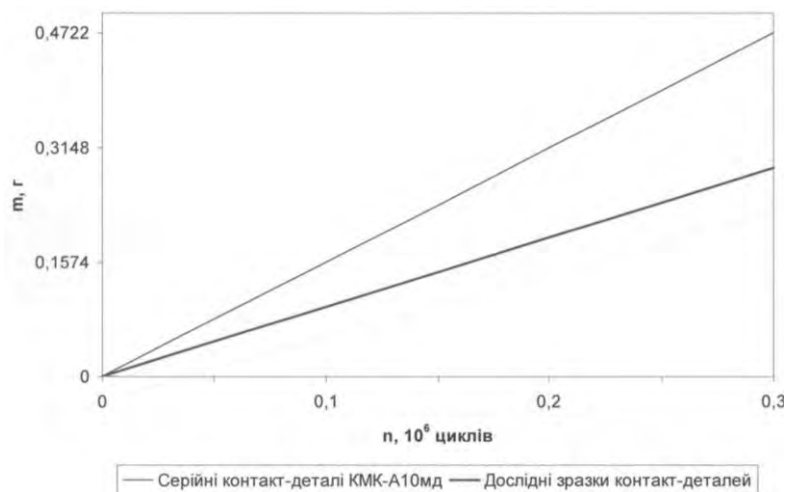
При змінному струмі 40 А, контактна поверхня піддається більш низькій температурі, ніж при струмі 80 А. Тому перевага з ерозійної стійкості при струмі 40 А менш значна в порівнянні з КМК-АІОм, чим при 80А.



а

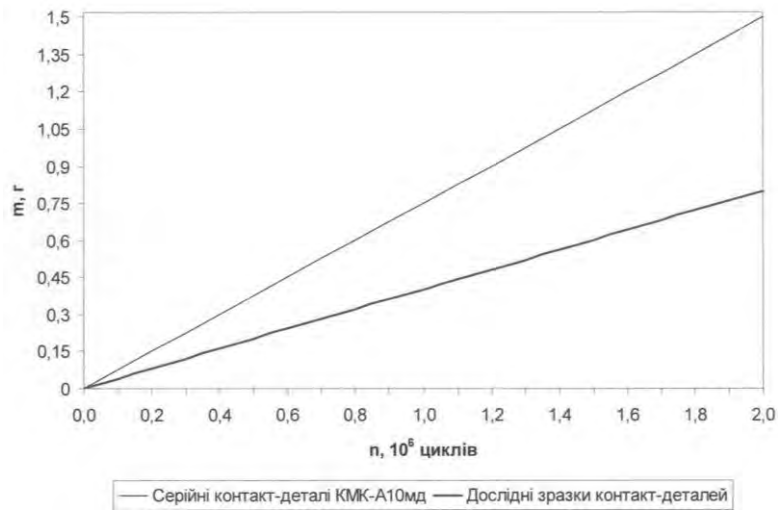


б

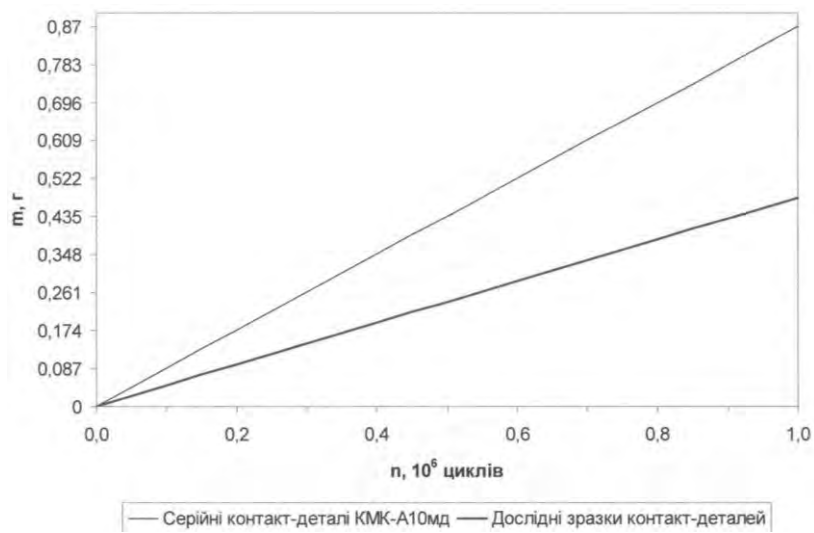


в

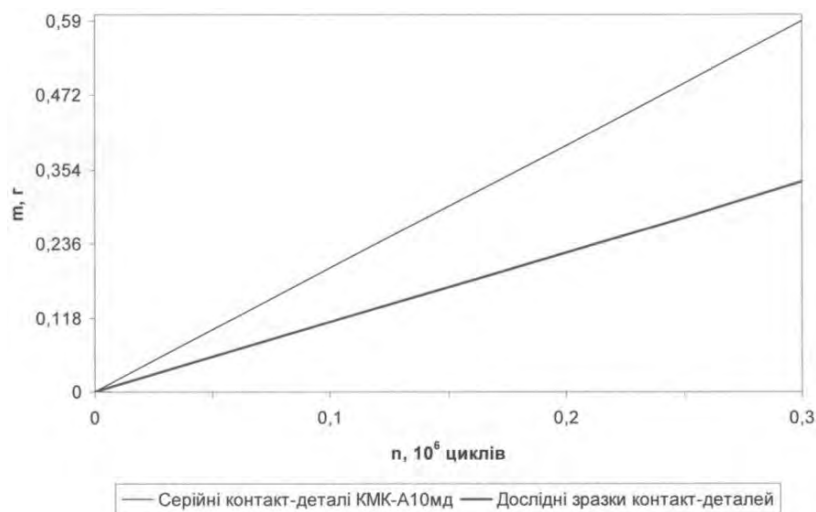
Рисунок 10.7 – Залежність електричної корозії контакт-деталей магнітного пускача від числа комутацій (сила струму – 40 А):  
 а – ПМЛ 3100 04А; б – ПМЛ 3110 04Б; в – ПМЛ 3110 04В



а



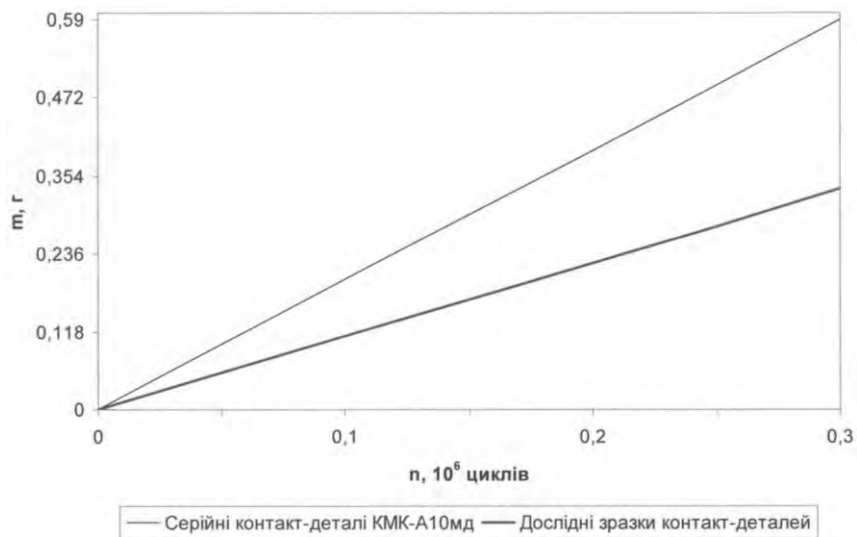
б



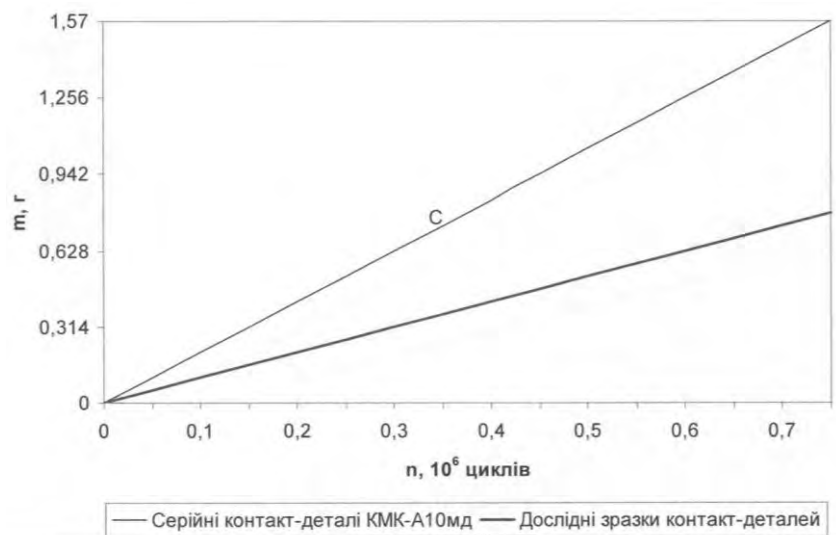
в

Рисунок 10.8 – Залежність електричної ерозії контакт-деталей магнітного пускача від числа комутацій (сила струму – 63 А):

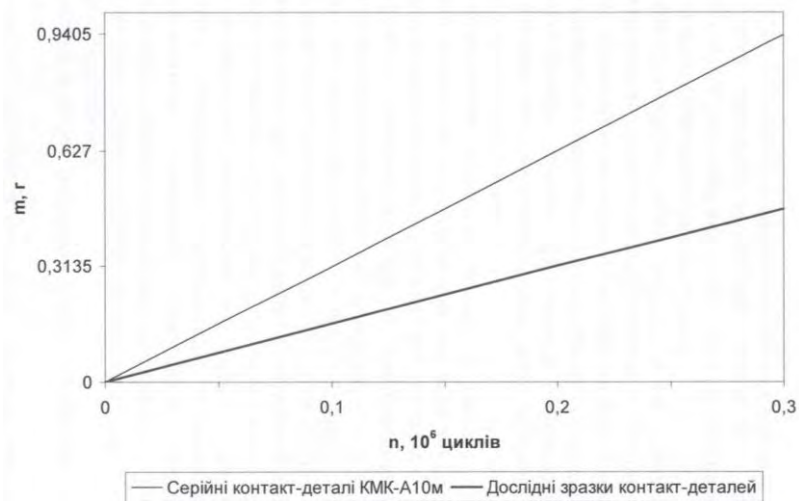
а – ПМЛ 3100 04А; б – ПМЛ 3110 04Б; в – ПМЛ 3110 04В



а



б



в

Рисунок 10.9– Залежність електричної ерозії контакт-деталей магнітного пускача від числа комутацій (сила струму – 80 А):

а – ПМЛ 3100 04А; б – ПМЛ 3110 04Б; в – ПМЛ 3110 04В



# 11 ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ І МОРФОЛОГІЇ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ВІДНОВЛЕНИХ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ ПІСЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ЇХ НА ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ

## 11.1 Структурні особливості спечених заготовок комбінованих матеріалів на основі Ag

Методи мікроскопії дозволяють значно розширити уяву про механізм і кінетику ряду процесів порошкової металургії і сприяти розкриттю механізму структуроутворення, яке значно впливає на формування властивостей електроконтактних матеріалів.

Мікроструктурний аналіз матеріалів на основі Ag з оксидними добавками дозволяє виявити загальну картину розподілу зміцнюючі добавок в матриці. Відносно рівномірно, у вигляді точкових включень розподілені частинки оксидів, які введені в матрицю срібну внутрішнім окисненням.

Мікроструктура зразків, при введенні різних оксидів подібні, видна матриця світлого тону, зернистої будови, зерна відтінені другою фазою, яка залягає між ними по границям.

З збільшенням кількості оксидів в матриці, появляються окремі скопичення оксидів, розміри проміжок між зернами зростають, а частинки Ag оказуються майже повністю ними оточені.

Структура руйнування поверхні композиційних матеріалів тісно зв'язана з природою компонентів композиційних матеріалів.

Крім того поведінка композита при руйнуванні залежить від розміру частинок, їх об'ємної кількості і міцності поверхні розділу.

Кінцева структура слабострумівих електричних контактів формується шляхом диспергування структурних складових і виникнення анізотропності матеріалу в результаті направленої деформації з одночасним утворенням субструктури. Формування анізотропної гетерофазної структури у багатокомпонентних композицій, направлений розподіл в структурі теплопровідності і електропровідності компонентів приводить до високих значень електро- і теплопровідності матеріалу в цілому і надає йому високу електроерозійну стійкість.

Введення в срібну матрицю оксидів In і Mn 5 % не дозволяє холодну деформацію.

З'являється текстура в результаті прокатки, формується анізотропна структура електроконтактного матеріалу.

Композиційні матеріали, зміцнені оксидами, тугоплавким матеріалом потребують 5 – 10 етапів прокатки з проміжним відпалюванням при температурі 600 °С на повітрі протягом години.

Процеси пластичної деформації остаточно формують структуру електроконтактного матеріалу. Введення нерозчинних фаз сприяють інтенсивному подрібненню зерна срібної матриці.

Частинки нерозчинних в компонентів також подрібнюються (диспергуються) і вистроюються в ланцюг вздовж деформованих зерен Ag і частково всередині них, зберігаючи орієнтацію в напрямку деформації. Ланцюги оксидів матриці, витягуються під дією деформуючих зусиль при зміні форми зерна а також їх розташування зберігається після відпалювання 600 °С.

Введення Zr в Ag визиває механізм в'язкого руйнування.

Методи мікроскопії дозволяють значно розширити уяву про механізм і кінетику ряду процесів порошкової металургії і сприяти розкриттю механізму структуроутворення, яке значно впливає на формування властивостей електроконтактних матеріалів.

Мікроструктурний аналіз матеріалів на основі Ag з оксидними добавками дозволяє виявити загальну картину розподілу зміцнюючи добавок в матриці. Відносно рівномірно, у вигляді точкових включень розподілені частинки оксидів, які введені в матрицю срібну внутрішнім окисненням.

Мікроструктура зразків, при введенні різних оксидів подібні, видна матриця світлого тону, зернистої будови, зерна відтінені другою фазою, яка залягає між ними по границям.

З збільшенням кількості оксидів в матриці, появляються окремі скопичення оксидів, розміри проміжок між зернами зростають, а частинки Ag оказуються майже повністю ними оточені (рис. 11.1).

Структура руйнування поверхні композиційних матеріалів тісно зв'язана з природою компонентів композиційних матеріалів.

Крім того поведінка композита при руйнуванні залежить від розміру частинок, їх об'ємної кількості і міцності поверхні розділу.

Кінцева структура слабострумівих електричних контактів формується шляхом диспергування структурних складових і виникнення анізотропності матеріалу в результаті направленої деформації з одночасним утворенням субструктури. Формування анізотропної гетерофазної структури у багатокомпонентних композицій, направлений розподіл в структурі

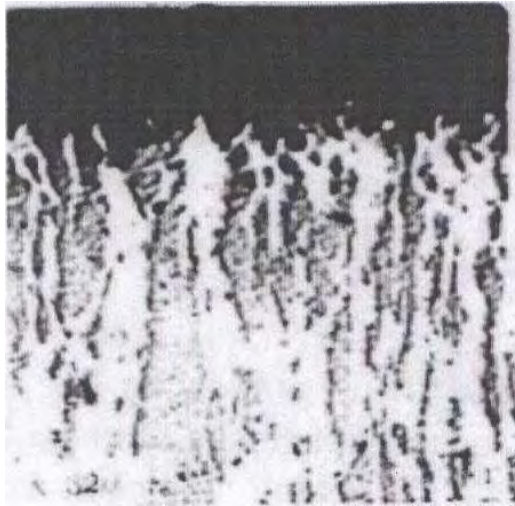


Рисунок 11.1 – Мікроструктура рухомого контакту із матеріалу CrNi-10 електромагнітного пускача ПМЛ-1100А після  $1 \times 10^5$  комутацій

теплопровідності і електропровідності компонентів приводить до високих значень електро- і теплопровідності матеріалу в цілому і надає йому високу електроерозійну стійкість.

Введення в срібну матрицю оксидів Іп і Ми 5% не дозволяє холодну деформацію.

З'являється текстура в результаті прокатки, формується анізотропна структура електроконтактного матеріалу.

Композиційні матеріали, зміцнені оксидами, тугоплавким матеріалом потребують 5 – 10 етапів прокатки з проміжним відпалюванням при температурі 600 °С на повітрі протягом години.

Процеси пластичної деформації остаточно формують структуру електроконтактного матеріалу. Введення нерозчинних фаз сприяють інтенсивному подрібненню зерна срібної матриці.

Частинки нерозчинних в Ag компонентів також подрібнюються (диспергуються) і вистроюються в ланцюг вздовж деформованих зерен Ag і частково всередині них, зберігаючи орієнтацію в напрямку деформації. Ланцюги оксидів матриці, витягуються під дією деформуючих зусиль при зміні форми зерна а також їх розташування зберігається після відпалювання 600 °С

Введення 2х в Ag визиває механізм в'язкого руйнування.

## **11.2 Металографічний та рентгеноспектральний аналіз структури робочої поверхні серійних контактів**

Поглиблене вивчення фізичних процесів, які відбуваються на робочій поверхні контактів у процесі експлуатації, створює передумови для дальшої

боротьби з електричною ерозією, яка є однією з основних причин руйнування електричних контактів.

Мікроструктура є одним із головних факторів, що впливає на властивості електричного контакту.

Мікроструктура перш за все залежить від технології виробництва, властивостей вихідних матеріалів, конструктивних особливостей апарату, енергії електричної дуги, складу навколишньої атмосфери.

На рис. 11.2 приведена вихідна мікроструктура контактного матеріалу типу СrН-10 електромагнітного пускача ПМЛ-1100А після  $1 \times 10^5$  комутацій.

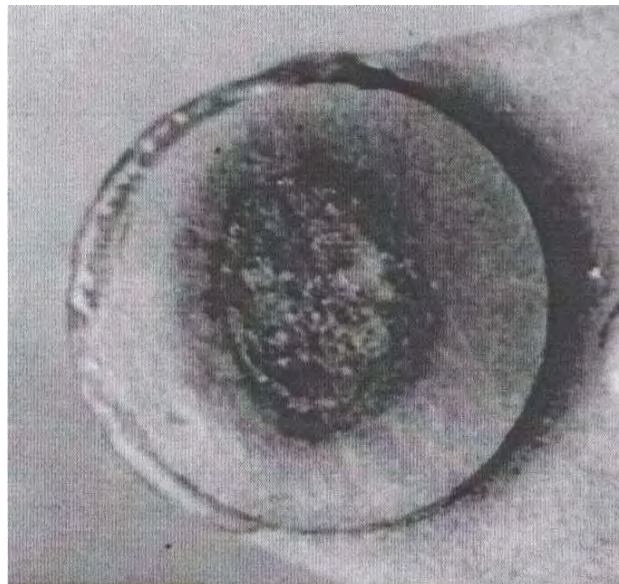


Рисунок 11.2 – Зовнішній вид рухомого контакту з матеріалу СrН-10 електромагнітного пускача ПМЛ-1100А після  $1 \times 10^5$  комутацій

По мірі наближення до робочої поверхні розміри зерен срібної та нікелевої фази збільшуються, внаслідок термічної дії дуги. Робоча поверхня збіднена срібною складовою, яка випарувалась, оскільки температура випаровування срібла ( $2210\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) значно нижча температури випаровування нікелю ( $2730\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

На робочій поверхні з'являються мілкі пори й раковини, де було срібло й скупчення зерен тугоплавкої складової нікелю.

Глибина шару в якому відбуваються мікроструктурні зміни досягає  $0,05 - 0,08$  мм. Нікель безпосередньо на контактній поверхні й на глибині до  $0,05$  мм окислюється.

Під час роботи електричного контакту відбувається плавлення та інтенсивне випаровування легкоплавкої складової – срібла з робочої поверхні катоду, внаслідок чого формується дискретна, бугриста поверхня (рис. 9.2) ступінь шорсткості залежить від сили струму та числа комутацій. На ерозійній

поверхні з'явилися крупні виступи, у поглибленнях структури розташовані світлі включення, які по даним рентгеноспектрального аналізу являють собою чисте срібло. Хімічний аналіз приповерхневого шару показав, що кількість нікелю на робочій поверхні значно збільшується (від 10 до 20 – 25%), що свідчить про першочерговість випаровувань срібла з поверхні контакту в процесі комутації електричного струму.

Детальне дослідження робочої поверхні контактів дозволило встановити, що внаслідок дії дуги плавиться не тільки легкоплавка композиція – срібло, але також і зерна нікелю (рис. 11.3 а), що підтверджується наявністю характерних ступенів затвердіння по краям нікелевих зерен (рис. 11.3 б). Загуслі зерна нікелю мають форму конуса, що типово для мостикового переносу (рис. 11.3 в).

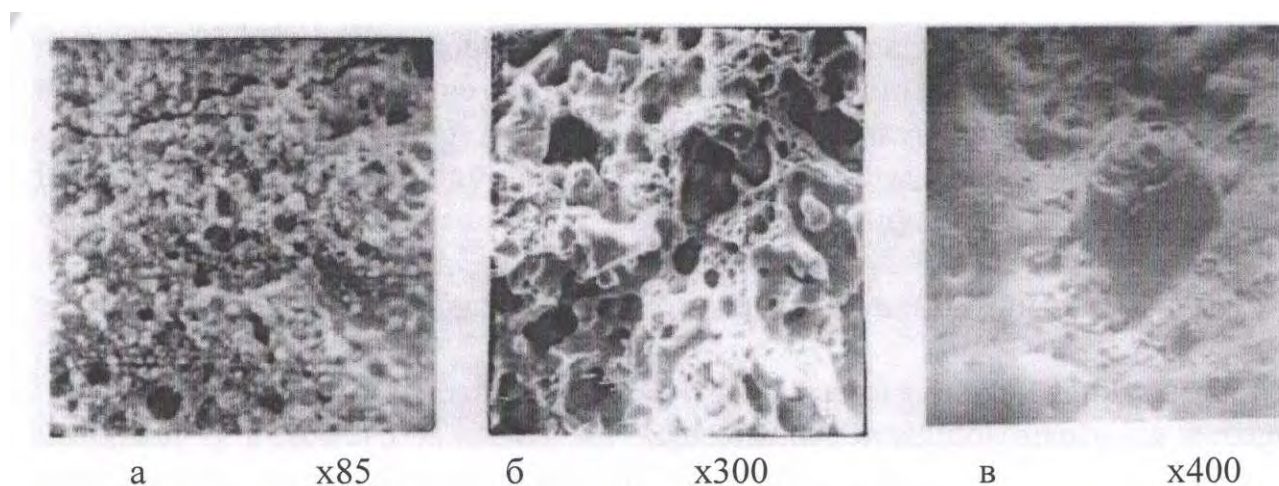


Рисунок 11.3 – Електронно-мікроскопічні знімки поверхні контактів СрН-10 після  $1 \times 10^5$  комутацій

На вершинах деяких нікелевих зерен утворюються ділянки в'язкого відриву, що свідчить про руйнування матеріалу після злипання контактів.

Отримані результати дають змогу стверджувати, що контактування в останній момент здійснюється по точках тугоплавкої складової, яка й визначає нахил матеріалу до зварювання.

Найнижчою електроерозійною стійкістю володіють контакти з матеріалу СрМ-0,2[3], хімічний склад якого відповідає: Cu – 0,1 – 0,5%; Ni – 0,005 – 0,2%, Ag – решта.

При комутації струму 4; 6,3; 10 А контактами із цього матеріалу спостерігається обгоряння та оплавлення робочих поверхонь контактів.

Металографічний аналіз показав, що в процесі роботи мікроструктура поверхневих шарів суттєво змінюється.

Із рис. 9.4 видно, що при комутації струму матеріал, який переноситься на нерухомий, нагрівається до температури кипіння, частково переноситься на

поверхню більш холодного нерухомого контакту, а решта осідає знову на поверхню рухомого, утворюючи порожнини (на рис. 11.4 чорні кратери стовпчасті зерна перпендикулярні до робочої поверхні контакт).



Рисунок 11.4 – мікроструктура контакту із матеріалу SrH-10 після  $1 \times 10^5$  комутацій

Мікроструктура нерухомого й рухомого контакту різна по своїй будові: На рис. 11.5 поверхня аноду покрита дрібними зернами парів метал} катоду, які кристалізувались при гасінні електричного розряду.



Рисунок 11.5 – Мікроструктура контакту із матеріалу SrH-10 після  $1 \times 10^5$  комутацій

Також на поверхні, де осіли пари металів, можна бачити збільшенні зерна срібла, що утворилися внаслідок рекристалізації під дією температури парів металу.

При комутації постійного струму відбувається направлений перенос матеріалу з рухомого контакту на нерухомий. Внаслідок цього на катод: утворюється кратер, а на аноді виступ.



Рисунок 11.6 – Зовнішній вигляд контактів із матеріалу  $\text{CrM-0,2}$  електромагнітного пускача ПМЛ-1100В після  $1 \times 10^5$  комутацій ( $I = 6,3 \text{ A}$ ):

а – анод, б – катод

### 11.3 Дослідження морфології робочих поверхонь електричних контактів

Створення високоякісних електроконтактних матеріалів пов'язана із структурним перетворенням робочих поверхонь компонентів і масовому перерозподілі компонентів композиційного матеріалу в процесі комутації електричного струму.

Структурно-морфологічні дослідження робочих поверхонь при комутації струму до 10 А, дають можливість прослідкувати етапи структурних перетворень в процесі експлуатації і їх вплив на надійність електроконтактної пари.

Ціллю морфологічного дослідження є вивчення механізму масо – переносу і закономірності ерозійного руйнування контактних пар, виготовлених із матеріалів на основі  $\text{Ag}$  з введенням в їх склад добавок оксидів і тугоплавкого металу.

На першому етапі досліджування робочі поверхні контактів, виготовлених із матеріалів  $\text{Ag-Zr-Y}_2\text{O}_3$ .

При навантаженні 2 А на катоді формується кратер з оплавленими краями, поверхня якого вкрита дрібними краплями, представленими за даними

мікроаналізу чисте срібло, є сліди тугоплавкого металу Zr. Анод – рівномірно покривається частинками перенесеного з катоду Ag.

Збільшення потужності дуги до 5 А змінює топографію робочої поверхні контактів. Не дивлячись на зміну струмового навантаження, знос стає більш рівномірним, а поверхня більш однорідна.

На деяких ділянках катоду інтенсивно випаровується Ag, окремі зерна тугоплавкого металу – цирконію оголюються.

Це зв'язано з тим, що дуговий канал на композиційних матеріалах закріплюється на катоді і аноді на границях зерен, блоків і на частинках оксидів, які володіють більш низькою тепловіддачею порівняно з Ag матрицею.

Наявність в матриці оксидів полегшує виникнення емісійних центрів на границі метал-діелектрик і центрів пароутворення.

Маса аноду при цьому трохи зменшується, хоча його поверхня збагачується Ag, яке осідає на ній перенесеного з катоду, формує рівну поверхню, на якій зустрічаються оплавлені ділянки.

При комутації струму 6 А створюється динамічна рівновага обміну матеріалом між електродами.

В умовах більш потужної дуги (7 А) проявляються глибинні ефекти під дією швидких електронів, які створюють локальні осередки перегріву.

Основна кількість енергії, яка передається аноду, виділяється не на поверхні, а на деякій глибині і визиває інтенсивний розігрів металу.

Пароподібне срібло виривається на поверхню аноду, формуючи глибокі кратери.

Інтегральний спектр має лінії всіх трьох елементів композиційного матеріалу: Ag-Zr-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Поверхня катоду є згладженою і в свою чергу покривається в окремих місцях, видалених від осередків перегріву, дрібними частинками срібла, перенесеного з поверхні аноду. Струмове навантаження 10 А підсилює процеси як об'ємного так і поверхневого перегріву.

На робочій поверхні катоду виникає декілька характерних зон, зв'язаних з наявністю горизонтального градієнта температур вздовж робочої поверхні.

В центральній частині, де в більшості випадків дуга закріплюється, відбувається інтенсивне випаровування, оплавлення, розбризкування Ag з обох контактів.

На периферії, більш холодній порівняно з центральною частиною, срібло осідає в вигляді частково оплавлених пластівців, причому осадження переважає на катоді, і як наслідок, зростає його маса.



Внаслідок збільшення термічних і механічних напруг на поверхні електродів при цьому режимі роботи можуть з'являтися мілкі тріщини.

Як на катоді, так і на аноді за даними мікроаналізу є лінії всіх елементів композиційного матеріалу: Ag, Zr, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

На поверхні катоду можна розрізнити 3 концентрично розташованих зони:

Перша знаходиться на краю електрода і являє собою осівші конгломерати Ag в вигляді пластивців.

Друга область - суцільний шар срібла.

Центральна частина – найбільш виступаюча, збагачена цирконієм і Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Структура поперечного перерізу наросту і дані мікроаналізу дозволили визначити характер масо переносу компонентів композиційного матеріалу на поверхню катоду. На початку періоду комутації на поверхню катоду переноситься срібло, що супроводжується збагаченням поверхні аноду введеними добавками.

Після такого збагачення поверхні аноду вже добавки інтенсивно переносяться на катод, де вони розташовуються паралельно робочій поверхні контакту у вигляді тяжких включень.

Мікроаналіз показав, що вони складаються з металевих добавок. В який то момент поверхня аноду збагачується сріблом і в дузі переноситься в основному більш легкоплавка складова.

Струмове навантаження 10 А енергетично обумовлює інтенсивне знімання як матеріалу матриці, так і введених в срібло добавок.

В процесі масо переносу починають послідовно приймати участь компоненти матеріалу в порядку зменшення їх теплопровідності і зростання тугоплавкості в відповідності з зростанням енергетичних характеристик процесу.

Йде поетапний перенос складових: спочатку випаровується срібло, потім введені компоненти, потім весь цикл повторюється знову.

Доцільно при експлуатації кожного конкретного матеріалу використовувати його для комутації струмів, що відповідають струмам його зони інверсії, що визначає менші втрати матеріалу контактної пари.

Для матеріалу Ag-Zr-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> діапазон струмів 5 – 7 А, а для матеріала Ag-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – С – діапазон струмів від долів ампера до 2 А.

Аналіз результатів ерозійних випробувань і структурно-морфологічних досліджень робочих поверхонь контактів дають можливість виявити важливі значення зони інверсії масопереносу, як критерію оцінки електроконтактного

матеріалу поряд з основними електроконтактними характеристиками, як зони його оптимальних струмових навантажень.

Характеристика кожного контактного матеріалу для визначення його роботоздатності в конкретному апараті, повинна мати не тільки основні електроконтактні властивості, але і точки інверсії масо переносу даного матеріалу в інтервалі струмових навантажень в заданому режимі навантаження.

Робота контактів в зоні інверсії дозволяють значно знизити безповоротні втрати дорогоцінних металів в процесі ерозії, що важливо в економічному аспекті. Використання критерію зони інверсії знизить до мінімуму імовірність похибки при виборі електроконтактного матеріалу для повних умов роботи.

#### 11.4 Дослідження морфології і мікроструктури відновлених робочих поверхонь при комутації постійного струму

Металографічний та рентгеноспектральний аналіз дослідження морфології робочих поверхонь та їх мікроструктури дозволив виявити закономірність впливу енергій дуги на розподіл фаз складових в поверхневих шарах контакт-деталей. .

На графічній залежності (рис. 11.7) зміни масопереносу від сили комутуючого струму можна виділити три зони: доінверсійна, інверсійна та позаінверсійна.

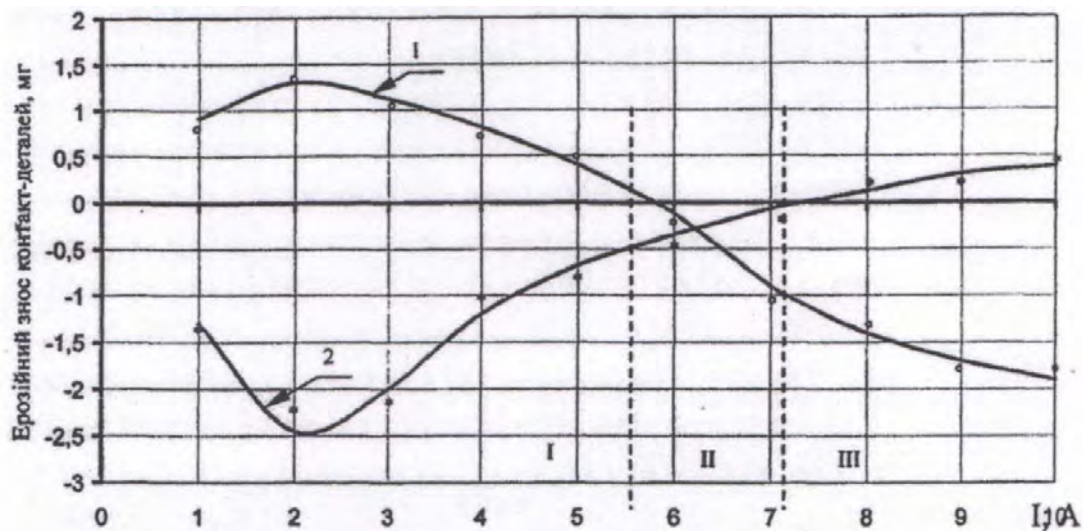


Рисунок 11.7 – Залежність електричної ерозії дослідних зразків контакт-деталей реле від величини струму (матеріал 95 % Ag + 4 % Zr + 1 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):

1 – анод; 2 – катод ( $n = 5 \cdot 10^4$  циклів комутацій)

Перша зона – доінверсійна – для дослідного контактного матеріалу № 1 знаходиться в межах струму 1 – 5 А. При струмах 1 – 3 А на катоді формуються кратери з оплавленими межами, також поверхня катода покрита сконденсованими краплями срібла (рис. 11.7 а). Анод при цьому вкривається частинками перенесеного з катода срібла в вигляді пласту (рис. 11.7 б). Характерним є локальне поверхнєве нагрівання контакт-деталей.

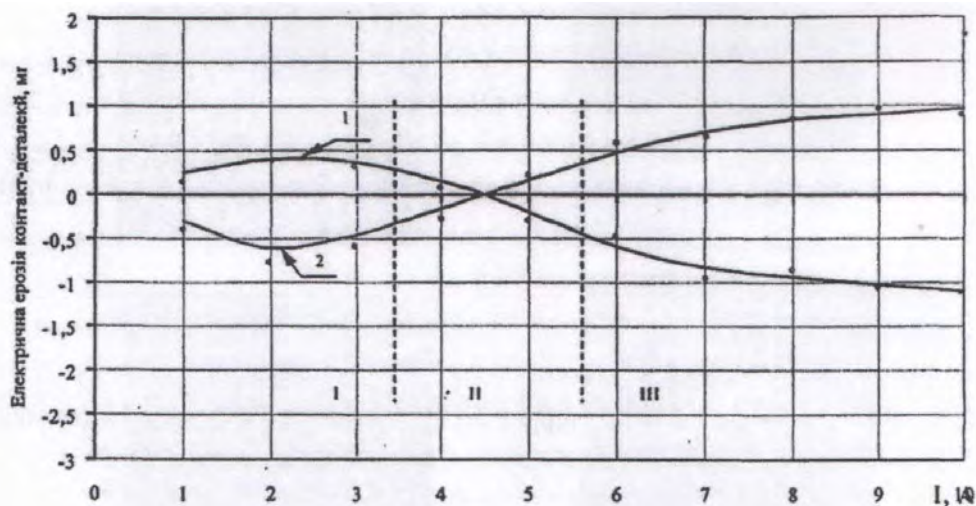


Рисунок 11.8 – Залежність електричної ерозії дослідних зразків контакт-деталей реле від величини струму (матеріал 92,8 % Ag + 3,5 % Zr + 2 % C + + 1 % CaO + 0,7 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):

1 – анод; 2 – катод ( $n = 5 \cdot 10^4$  циклів комутацій)

Наявність в матеріалі оксиду ітрію Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> полегшує виникнення емісійних центрів на межі метал-діелектрик, які є центрами пароутворення композиційного контактного матеріалу 95%Ag+4мас%Zr+1мас%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при  $5 \cdot 10^4$  циклів комутацій та навантаженні 10А постійного струму (рис. 11.9 в). Особливо це проявляється при струмах 4 – 5 А. Маса аноду при цьому струмі трохи зменшується хоч його поверхня збагачується сріблом з катода, котрий осідає на ній, формуючи гладку поверхню, на якій формуються оплавлені ділянки (рис. 11.9 г).

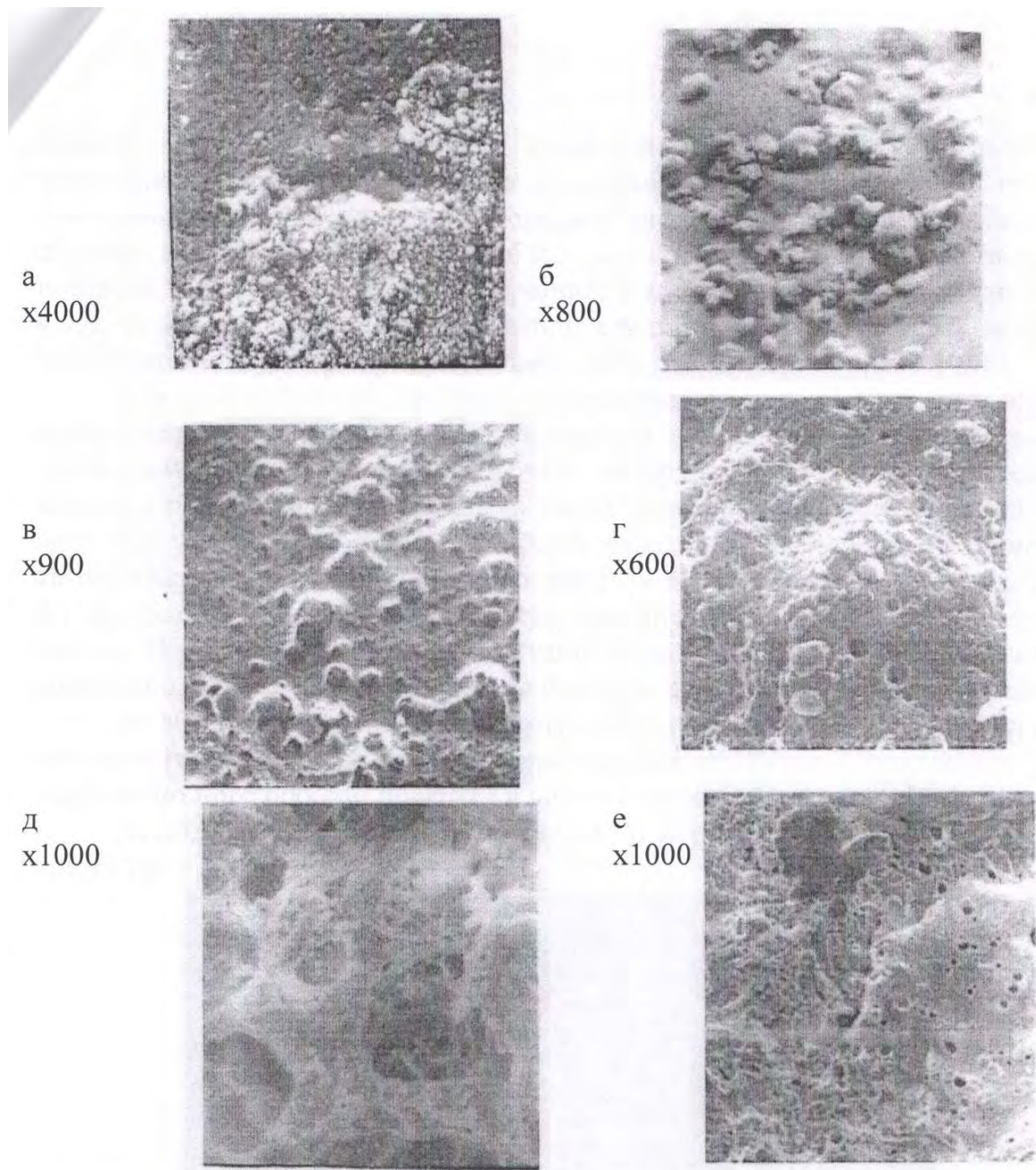


Рисунок 11.9 – Мікроструктура робочих поверхонь контакт-деталей дослідного

Друга зона – інверсійна - знаходиться в межах струму 5 – 7 А (рис. 11.7) і характеризується мінімальним ерозійним зношуванням контакт-деталей. Електрична ерозія іде одночасно з двох контакт-деталей. До точки інверсії – 6,3 А (рис. 11.7) направлений масоперенос переважає на катоді, після точки інверсії – на аноді. Поверхня катоду характеризується численними дрібними кратерами-слідами центрів пароутворення під поверхнею, величина яких зростає із збільшенням струму. Поверхня катоду починає оплаватися внаслідок сумарного нагрівання, як з поверхні, так і шляхом передачі тепла з глибинних шарів (рис. 11.9 д). Мікрорельєф аноду згладжується, хоч кількість

ділянок вкритих частинками срібла, які осіли, значно збільшується, на поверхні також спостерігаються кратери, з яких випаровується срібло (рис. 11.9 е). За даними мікроаналізу на катоді та аноді присутні лінії всіх елементів композиційного матеріалу: срібла, цирконію, оксиду ітрію (рис. 11.10).

Третя зона – позаінверсійна – знаходиться в межах 7 – 10 А (рис. 11.7) та характеризується інтенсивністю ерозійних процесів і горизонтальним градієнтом температур на робочій поверхні. Процеси масопереносу посилюються порівняно з першими двома зонами. Переважає анодна дуга і на катоді утворюється виступ матеріалу внаслідок масопереносу з аноду на катод. Мікроструктура поперечного перерізу виступу кратеру на аноді (рис. 11.11а), дозволила визначити характер масопереносу на робочу поверхню катоду. В початковий період комутації на поверхню катоду переноситься срібло, що призводить до збагачення поверхні аноду введеними домішками.

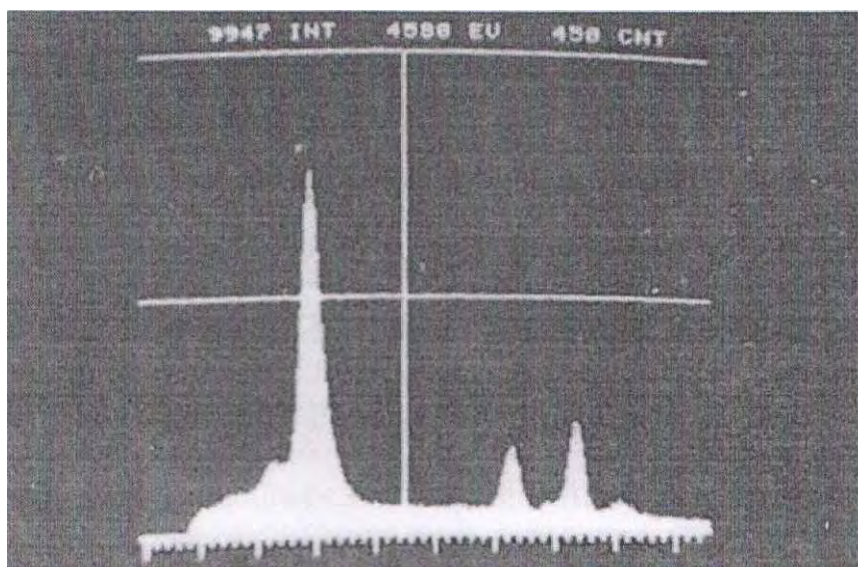


Рисунок 11.10 – Енергетичний спектр рентгенівського випромінювання робочої поверхні контакт-деталі, при комутації струму 10 А. кількості циклів комутації  $n = 5 \cdot 10^4$

Із збільшенням кількості комутацій, поверхня аноду збагачується оксидом ітрію та цирконію, які переносяться на катод і розташовуються паралельно його робочій поверхні у вигляді темних включень (рис 11.11 б).

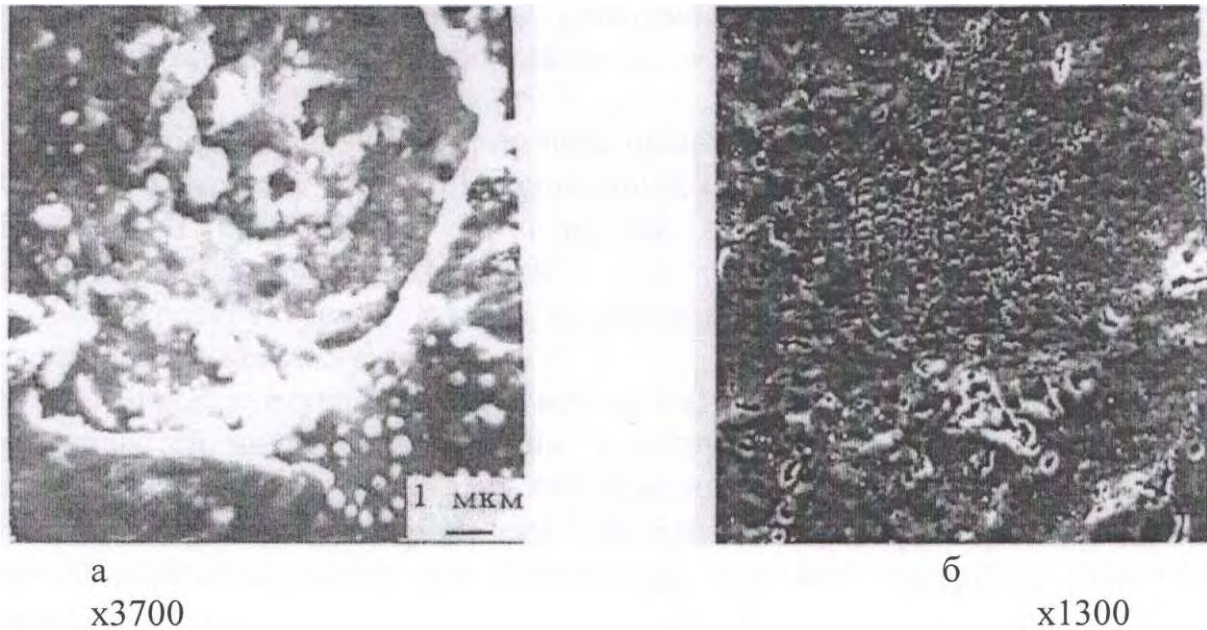


Рисунок 11.11 – Мікроструктура поверхневого шару контакт-деталей при комутації струму 10 А, кількості циклів комутацій  $n = 5 \cdot 10^4$  (матеріал контакт-деталей 92,8 % Ag + 3,5 % Zr + 2 % С + 1 % CaO + 0,7 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):

а – анод; б – катод

Дослідження морфології робочих поверхонь більш складного за кількістю інгредієнтів дослідного композиційного контактного матеріалу №2 наступного складу: 92,8мас%Ag+3,5мас%Zr+2мас%С+1мас%CaO+0,7мас%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> виявили специфічні особливості процесу електричної ерозії.

Специфічною особливістю даного матеріалу є утворення нової точки інверсії при струмовому навантаженні 4,5 А, а також підвищення електроерозійної стійкості в цілому порівняно з дослідним матеріалом №1 (рис. 11.7) та дослідним №2 (рис. 11.8).

Так в доінверсійній зоні при струмовому навантаженні 2 А, електроерозійна стійкість в 4 рази вища порівняно з дослідним матеріалом №1 і в 2 рази при струмі 10 А (рис. 11.7 та рис. 11.8). Це досягається за рахунок введення в композиційний матеріал додаткового комплексу добавок, якими є 2 мас % С (графіт) та 1 мас% CaO (оксид кальцію). Внаслідок цього відбувається поетапний масоперенос інгредієнтів, які послідовно приймають участь в ерозійних процесах за порядком зростання температури плавлення та зниження теплопровідності.

Якщо для першої зони дуга складається переважно із парів срібла, то в другій зоні в дузі одночасно утримуються пари срібла і легуючих домішок, а для третьої зони типовими є переважна наявність в дузі парів срібла або парів легуючих домішок. Внаслідок цього відбувається поетапний масоперенос

інгредієнтів, які послідовно приймають участь в ерозійних процесах за порядком зростання температури плавлення та зниження теплопровідності.

### **11.5 Металографічний та рентгеноспектральний аналіз структури; робочої поверхні дослідних контактів**

Поглиблене вивчення фізичних процесів, які відбуваються на поверхні контактів у процесі експлуатації, створює передумови для боротьби з електричною ерозією, яка є однією з основних – руйнування електричних контактів.

Мікроструктура є одним із факторів, що впливає на властивості електричного контакту.

Мікроструктура перш за все залежить від технології виробництва властивостей вихідних матеріалів, конструктивних особливостей адатат енергії електричної дуги, складу навколишньої атмосфери.

На рис. 11.12 приведена вихідна мікроструктура дослідне: ерозійностійкого екологічно безпечного контакту матеріалу наступного складу:

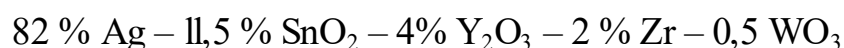


Рисунок 11.12 – Мікроструктура дослідного ерозійностійкого і екологічно безпечного контактного матеріалу (збільшено у 150 разів)

Мікроструктура дослідного контактного матеріалу складається з областей чітко виділених зерен та білих йолів. Мікроструктура зразків окислених при 750 °С, являє собою чітко виділені зерна.

Як показали виміри мікротвердості, білі поля мають більш високі значення  $H_v = 146 - 248$  кгс/мм<sup>2</sup>, а для зерен  $H_v = 110 - 153$  кгс/мм<sup>2</sup>. Білі поля – це дуже дрібні частинки оксиду олова, що розташовані в середині зерен срібла: визивають значне дисперсне твердіння срібної матриці.

В ділянках з виділеними границями оксид олова розташовується в основному на границях зерен, тому твердість цих ділянок нижча.

Структура поверхні руйнування енергією електричної дуги тісно пов'язана з фізико-механічними властивостями оксидів і цирконію, розмірів частинок їх об'єктної кількості і міцності поверхні розділу.

Металографічний аналіз показав, що в процесі роботи мікроструктура поверхневих шарів суттєво змінюється.



## ВИСНОВКИ

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження відновлення контактних вузлів дозволяють зробити такі основні висновки:

1. Отримані локальні покриття з різноманітних типів контактних матеріалів, які характеризуються високою міцністю та електростійкістю методом газоплазмового напилення. Для цього може бути використане достатньо нескладне і просте в експлуатації обладнання.

2. Визначена структурна схема керування кінетикою утворенню механічних властивостей, відновлення зношених поверхонь контакт-ієгео-електричних апаратів. Частинки матеріалу розподіляються по діаметру, а товщина покриття визначається згідно розподілу Гауса.

3. Встановлені функціональні залежності впливу сили стт характеру навантаження, параметрів навколишнього середовища, фізико-механічних властивостей матеріалу (температура плавлення, твердість на процеси руйнування робочих поверхонь контактів та показники надійного контактування).

4. Відновлення зношених поверхонь контакт-деталей новими композиційними матеріалами (патент № 18931 15.11.2004р) дозволило підвищити електроерозійну стійкість в 1,6 – 2 рази в порівнянні з серійними типу КМК-А10м

5. Фізико-хімічні процеси в плазмі дуги при напилюванні залежить швидкості руху металевих часток до моменту їх зіткнення з підкладкою, процесів теплообміну що супроводжуються фазовими перетвореннями (плавленням, випаровуванням) порошкових матеріалів до моменту їх участі у формуванні покриття.

6. На якість покриття впливають величини теплової і кінетичної енергії часток порошку, якій наноситься на поверхню, розміри часток, їх форма та хімічний склад.

7. Основними факторами формування металопокриття є конструкція плазмотрону, хімічний склад, розмір і форма порошку, фізико-хімічні та теплофізичні властивості матеріалу порошку.

Однією з основних характеристик процесу формування покриття є температура, яка виникає в зоні контакту напиленої частки з поверхнею. Нагрівання часток вище температури плавлення підвищує міцність їх з'єднання з основою, збільшує площу плями хімічної стійкості.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А.с. №1677723 СРСР, МКИ5 Н 01 Н 1/02, С 22 С9/00. Спечений матеріал на основі міді для електричних контактів / Т.О.Донцова, Г.М.Братерська, С.П.Коханівський, В.А.Наливайко, В.В.Коробський, А.А.Григорьев (СРСР); УСГА. - №4755177/02; Заявл. 01.11.89; Опубл. 15.09.91, Бюл. №34.-2 с.
2. А.с. №1690501 А1 СРСР, МКИ5 Н 01 Н 1/04, 1/02. Контактна пара низьковольтного електричного апарату / Г.М.Братерська, С.П.Коханівський, Т.О.Донцова, В.А.Наливайко, В.В.Коробський, І.П. Радько (СРСР); УСГА і ІПМ АН УРСР. - №4623915/02; Заявл. 23.12.88. (для службового користування). Відкритим друком не опубліковано.
3. А.с. №1775739 А1 СРСР, МКИ5 Н 01 Н 1/04, С22 С9/00. Контактна пара /Г.М.Братерська, С.П.Коханівський, Т.О.Донцова, М.Ф.Сагач, І.П.Радько, В.А.Наливайко, В.В.Коробський (СРСР); УСГА. - №4877782/02; Заявл. 12.09.90. Опубл. 15.11.92, Бюл. №42. - 2 с.
4. А.с. СССР N 1677723. Спеченный материал на основе меди для электрических контактов. МКИ 5 Н 01 Н 1/02, С22 С 9/00. 15.05.91 /Братерская Г.Н., Кохановский СП., Донцова Т.А., Наливайко В.А., Коробский В.В. Заявл. 01.11.89; Опубл. 15.09.91. Бюл. N 34.
5. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Е.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
6. Антошин Е. В. Нанесение металлических и неметаллических покрытий посредством газоплазменного напыления. М.: 1965. - 72 с.
7. Барабашук В.М., Креденцер Б.П., Мирошниченко В.И. Планирование эксперимента в технике. К.: Техніка, 1984. 200 с.
8. Братерская Г.Н., Кохановский СП., Наливайко В.А., Доцова Т.А. Влияние эксплуатационных факторов на работу контактов автоматических выключателей электроустановок животноводческих ферм //Состояние и перспективы развития производства аппаратов низкого напряжения: Тез. докл. VI Всесоюз. научн-техн. конф. Харьков, 1990. - С. 63-64.
9. Брон О.Б. Проблемы контактов в сильноточном аппаратостроении /Электрические контакты. Повышение качества и надежности. Киев, 1985. - С. 52-55.
10. Брон О.Б., Дмитренко А.И., Бойко В.П. Рост посторонних пленок между замкнутыми контактами электрических аппаратов // Электромеханика. 1987. -N 11. - С. 95-99.

11. Брон О.Б., Сушков Л.К. Потоки плазмы в электрической дуге электрических аппаратов. Л.: Энергия, 1975. - 260 с.
12. уткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. - М.:Энергия, 1973. - 172 с.
13. Буткевич Г.В., Белкин Г.С. Электрическая эрозия высоковольтных контактов и электродов. М., 1978. - 253 с.
14. Вплив хімічного середовища на роботу комутаційних апаратів /Коханівський С.П., Наливайко В.А., Коробський В.В. Проблеми агропромислового комплексу: пошук, досягнення: Тези доп. наук. конф. проф.-викл. складу та аспірантів. К.: УДАУ, 1993. - С. 75.
15. Высокоэнергетические процессы обработки металлов / О.П.Солоненко, А.П.Алхимов и др. Жуков М.Ф., Фомин В.М. (отв. ред.) - Новосибирск: Наука. Сиб. отд. фирма РАН. 2000. - 425 с. - рис. (низкотемпературная плазма. Т. 18).
16. Газоплазменные порошковые покрытия и их механическая обработка / Общество «Знание» Украины. - К.: 1933. - 20 с.
17. Газотермические покрытия / В.Н.Анциферов, А.Мшмаков, С.С.Агеев. РАН Уральское отд. Ин-т металлургии (ред.). - Екатеринбург, Наука, 1994. -318с.
18. Газотермическое напыление композиционных порошков / А.Я.Кулик. Ю.С.Борисов, А.С.Мнухин / - Л.: Машиностроение. Лен.отд., 1985. - 199 с.
19. ГОСТ 1497-84 (СТ СЭВ 471-74). Металлы. Методы испытаний на растяжение.
20. ГОСТ 17441-84. Соединения контактные электрические. Правила приемки и методы испытаний.
21. ГОСТ 19725-74. Аппараты электрические коммутационные. Контакты на основе серебра.
22. ГОСТ 24606.3-82 (СТ СЭВ 3985-83). Изделия коммутационные, установочные и соединители электрические. Методы измерения сопротивления контакта и динамической и статической нестабильности переходного сопротивления контакта.
23. ГОСТ 24682-81. Изделия электротехнические. Общие технические требования в части стойкости к воздействию специальных сред.
24. ГОСТ 24683-81. Изделия электротехнические. Методы контроля стойкости к воздействию специальных сред.

25. ГОСТ 24813-81. Испытание изделий на воздействие климатических факторов. Общие положения.
26. ГОСТ 2491-82 (СТ СЭВ 5535-86). Пускатели электромагнитные низковольтные. Общие технические условия.
27. ГОСТ 25281-82 (СТ СЭВ 2287-80). Metallургия порошковая. Метод определения плотности формовок.
28. ГОСТ 2999-75. Металлы. Метод определения твердости по Виккерсу.
29. ГОСТ 403-73. Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппаратов.
30. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.
31. ГОСТ 9.905-82 (СТ СЭВ 3283-81) Методы коррозионных испытаний. Общие требования.
32. ГОСТ 9.908-85 (СТ СЭВ 4815-84, СТ СЭВ 6445-88) Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости.
33. ГОСТ 9.909-86 (СТ СЭВ 4200-83). Металлы, сплавы, покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы испытаний на климатических испытательных станциях.
34. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: Справочник. - М: Наука, 1979. - 247 с.
35. ДСТУ 2823-94. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення.
36. ДСТУ 2846-94. Контактори електромагнітні низьковольтні. Загальні технічні умови. - На заміну ГОСТ 11206-93.
37. ДСТУ 2993 - 95 (ГОСТ 2933 - 93). Апарати електричні низьковольтні. Методи випробувань.
38. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними.
39. ДСТУ 3020-95 Апарати комутаційні низьковольтні. Загальні технічні умови. - На заміну ГОСТ 12434-93.
40. ДСТУ 3668-97 (ISO 4498-90). Матеріали металеві, спечені, крім твердих сплавів. Визначення увної твердості матеріалів в основному з рівномірною твердістю у перерізі,
41. ДСТУ 3670-97 (ISO 2740-86). Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Зразки для випробування на розтяг.

42. Дулин В.А. Методы исследования надежности низковольтных аппаратов. - М.: Энергия, 1970. - 152 с.
43. Дулин В.А. Определение износостойкости контактов аппаратов управления переменного тока // Низковольтное аппаратостроение. Труды Всесоюз. н.-и. и пр.-технолог. ин-та электроаппаратостр.- М.: Энергия, 1970. - вып. 2.-С. 263-269.
44. Защитные металлические и неметаллические покрытия. Школа-семинар (Крым, 1994). Тез. докл. 5-7 мая 1994 (Днепропетровский ун-т. Научн. ред. Лошкарев А.В. - К.: 1994. -48 с.
45. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. - М.: Наука, 1976. - 396 с.
46. Иванов В.В. Технологическое исследование медно-алмазных порошковых материалов для электроконтактов // Перспективные материалы. - 1999.-№3.-С. 64-70.
47. Импульсные методы нанесения порошковых покрытий / Н.Н.Дорожкин и др. Под ред. Г.А. Анисимовича. - Минск: Наука и техника, 1985.-279 с.
48. Ионно-плазменные технологии получения пленок и покрытий. / Сб. тез. докл. Научно-техн. конф., 17-20 сентября 1991. Г. Полтава / РДЭНТП, Начн. Ред. С.В.Денбновецкий, - К.: 1991 - 52 с.
49. Кадыров В.Х. Высокоэнергетические процессы газоплазменного напыления. - К.: ИПМ, 1995. - 52 с.
50. Какуевицкий В.А. Применение газотермических покрытий при изготовлении и ремонте машин. - К.: Техника, 1989. - 176 с.
51. Калихман В.Л. Халькогениды переходных материалов со слоистой структурой класса MoS<sub>2</sub> и перспективы их применения в спеченных материалах для электрических контактов // Электротехн. пром. Сер. Электротехнические материалы. - 1984. - вып. 8 (169). - С. 4-5.
52. Катаева Н.К. Влияние параметров окружающей среды на надежность магнитных пускателей // Применение ингибиторов для защиты сельскохозяйственной техники от коррозии. Научные труды. - Челябинск: ЧИМЭСХ. - 1987.-С. 81-83.
53. Ким Е.И., Омельченко В.Т., Харин С.Н. Математические модели тепловых процессов в электрических контактах. - Алма-Ата: 1977. - 236 с.
54. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. - М.: Машиностроение, 1979.-432 с.

55. Кобленц М.Г. Исследование электрической износостойчивости контакторов // Электротехника. -1966. - №1. - С. 23-26.
56. Коррозионная стойкость легированных серебропалладиевых сплавов для электрических контактов / Альман Р.С., Федоренко В.П., Шпичинецкий Е.С. // Конструкцион. и прецезионные сплавы цвет. мет. - М.-1987. - С.59-63.
57. Корчемный Н.А., Машевский В.П. Повышение надежности электрооборудования в сельском хозяйстве. - К.: Урожай, 1988. - 176 с.
58. Коханівський СП., Наливайко В.А. Технічне обслуговування та ремонт силового електрообладнання. К.: Урожай, 1990. - 112 с.
59. Кречмар Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс. - М.: Машиностроение, 1966. - 432 с.
60. Кузнецов В. Д., Пащенко В. М. Фізико-хімічні основи створення покриттів: Навчальний посібник для студентів спеціальності «Технологія і устаткування відновлення та підвищення зносостійкості машин і конструкцій». Нац. техн. ун-т «КПІ» - К.: КПІ, 1999. - 176 с.
61. Куприянов И.Л., Геллер М.А. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. - Минск: Наука і тэхніка, 1990. - 175 с.
62. Мерл В. Электрический контакт. Теория и применение на практике. -М. - Л.: Госэнергоиздат, 1969. - 372 с.
63. Металлокерамические размыкаемые контакты с мелкодисперстной структурой // Электротехнические металлокерамические изделия. / Мелашенко И.П. и др. -М.: ВНИИЭМ, 1965.-С. 57-61.
64. Монослойные электроконтакты на основе серебра и меди. / Гордеев Ю.И., Зеер Г.М., Теремов С.Г., Зеленкова Е.Г. // Наука производству. - 2000. - №3.-С. 25-28, 67.
65. Намитокков К.К. Испытания аппаратов низкого напряжения. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 248 с.
66. Новые материалы для порошковой металлургии и защитных покрытий: Сб. науч. тр. / АН СССР. ДВО. Ин-т машиноведения и металлургии. Отв. ред. А.Д.Верхотуров. Владивосток, 1990. - 152 с.
67. Образцов В.А. Контрольные испытания низковольтных аппаратов. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. - 224 с.
68. Пат. N 1792445. Спеченый материал для электрических контактов на основе меди / Братерская Г.Н., Кохановський СП., Донцова Т.А., Наливайко В.А., Коробский В.В., Мрачковский А.М. МКИ 5 НОШ 1/02, С22С 9/00. Заявл. 03.07.91; Опубл.30.01.93. Бюл. N4.

69. Получение покрытий высокотемпературным распылением (сб. статей). Под ред. Л.К.Дружинина и В.В.Кудинова. М.:Атомиздат, 1973. - 312 с.
70. Разработка и применение технологии оборудования и материалов для газотермических процессов нанесения защитных покрытий: Тез. докл. научно-практ. конф. Минск, 5-6 июня 1990 г. / АН БССР. ФТИ и др. - Минск, 1990. -72с.
71. Румшпский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. - М.: Наука и техника, 1971. - 126 с.
72. Сагач М.Ф. Временная противокоррозионная защита сельскохозяйственной техники. - К.: УкрНИИНТИ Госплана УССР, 1991. - 124 с.
73. Сонин В.И. Газотермическое напыление материалов в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1973. - 152 с.
74. Состояние и перспективы развития производства аппаратов низкого напряжения // VI Всесоюзная научно-техническая конференция. Тез. докл. - Харьков: ВНИИэлектроаппарат. - 1990. - С. 116.
75. Спеченные материалы для электротехники и электроники / Под ред. Г.Г. Гнесина. - М.: Металлургия, 1981. - 343 с.
76. Справочник по электротехническим материалам /Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. 3-е изд., перераб. Т.З. Л.:Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. - 728 с.
77. Теория и практика газоплазменного напыления / П.А.Витязь, В.С.Ивашко и др. - Минск: Навука і тэхніа, 1993. - 295 с.
78. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А.Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф.Илющенко и др. - Минск: Беларуская наука, 1998. - 583 с.
79. ТУ 16-522.064-82. Выключатели автоматические АЕ 2000 М.
80. ТУ 16-685.028-86. Контакт-детали металлокерамические КМК-ТНб.
81. Тушинский Л. И., Плохов А. В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / отв. ред. М.Ф.Жуков; АН СССР, Сибирское отделение. Ин-т горного дела - Новосибирск: Наука. Сиб. Отд. 1986. - 196 с.
82. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление (пер. с японского) - М.: Машиностроение, 1985. - 239 с.
83. Экспериментальное исследование эффективности применения электропроводящих покрытий и смазок в контактных соединениях / Курбацкий В.Г., Сальникова М.К., Новиков В.К. // Известия вузов «Энергетика». - 1997. - №7-8. -С.32-36.
84. Экспериментальные и теоретические исследования по созданию нового поколения магнитных пускателей на токи до 160 А (перспектива до 2005

года): Отчет о НИР (закл.) / ВНИИР. - № ГР01890020984; Инв. №02890053785. - Чебоксары, 1989. - 115 с.

85. Электрические контакты. Пути повышения качества и надежности: Сб. науч. тр. - К.: ИПМ АН УССР, 1981. - 178 с.

86. Электрические контакты. Пути повышения качества и надежности: Сборник научных трудов. - К.: ИПМ АН УССР, 1987. - 206 с.

87. Электрические контакты и электроды. Повышения качества и надежности: Сб. науч. тр. - К.: ИПМ АН УССР, 1985. - 180 с.

88. Электрические контакты и электроды. Пути повышения качества и надежности: Сб. науч. тр. - К.: ИПМ АН УССР, 1989. - 202 с.

89. Электрические контакты и электроды: Сб. науч. тр. - К.: ИПМ АН УССР, 1991.- 138 с.

90. Электрические контакты и электроды: Сб. науч. тр. - К.: НАН Украины. ИПМ, 1996. - 130 с.

91. Электрические контакты и электроды: Сб. науч. тр. - К.: НАН Украины. ИПМ, 1999. - 163 с.

92. Электрические контакты: Труды совещания (11-14 декабря 1962 г.). Отв. редактор Б.С.Сотсков. - М.-Л.: Энергия, 1964. - С. 503.

93. Электрические контакты: Труды совещания (29 марта-01 апреля 1965 г.). Отв. редактор Б.С.Сотсков. - М.: Энергия, 1967. - С. 680.

94. Amft CD. Die Elektrodenabbrand durch Schaltlichtbogen in Zufft und in verschiedenen Gasen // Доклады 2-го симпозиума по электрическим аппаратам низкого напряжения. - Пловдив. - 1971. - Том 2. -С. 81-82.

95. Burkhart S. Entwicklungstrends moderner Industrie schaltgerate // Elektro Anzeiger. - 1986. - Bd 39, №2,5. - S. 16-20.

96. Campbell W.E. Reduction of the rate of film formation on silver and brass by purification of the atmosphere // Electrical Contacts. - 1972. - vol.2. -S. 186-194.

97. Drdger Hans-Joachim. Fremdschitwachstum bei Kontaktmaterialien der Energietechnik in agressiven Atmosphдren // Elektrotechn. Z.. - 1973. - A94, №9. -S. 562-564.

98. Fechant L., Muniesa I. Contacts Electrigues / RGE. - 1985. - №5. - P. 388-438 // Электротехн. пром. Серия «Преобразовательная техника, аппараты низкого напряжения, электропривод». Зарубежный опыт. - М.: Информэлектро, 1986.-вып. 4(85).-С. 3-7.

99. Fontana W.J. Establishing a reliability profile for new reed awitch relis // Electrical Contacts. - Chicago, 1967. - P. 195-230.



100. Freitag R. Wechselstrom schütze 3TF54 und 3TF56 - Beginn einer neuen Reihe. - Siemens Energie & Automatisierung, 1985. - Bd.5, №4. - S.21 // Электротехн. пром. Серия «Преобразовательная техника, аппараты низкого напряжения, электропривод». Зарубежный опыт. - М.: Информэлектро, 1986. - вып. 7 (88). - С. 6-7.
101. Gokhale D.D., Mozaes I. Improved contact materials and its effect on contactor design // Elec. India, (Siemens India Ltd.) - 1986. - 26, №16. - P. 11-20.
102. Hara T., Mano K. Effect of hydrogen sulfide contamination on the electrical characteristics of silver alloy contact / Electr. Eng. Japan. - 1967. - 87, №4. - P. 67-74.
103. Jones F.L. The Physics of Electrical contacts. - Oxford: Clarendon Press, 1957.-323 p.
104. Kluppel F.W. Berechnungsverfahren für die Bestimmung der Versorgungssicherheit in elektrischen Energienetzen // Energietechnik. - 1964. - №7.-S. 13-18.
105. Lindmayer M., Bühm W. Degussa, Geschäftsbereich, Technische Metallwerke und Forschung Metall D 6450 Hanau (FRG). Effect of Alkali on the Switching Behavior of Ag/CdO // Proc. of the Tenth International Conference on Electrical Contact Phenomena. - 1980. - P.849-862.
106. Mano K. The measuring method of the life reliability of electrical contacts // Electrical Contacts. - Chicago, 1970. - P. 101-108.
107. Miller K., Stocke D., Rau G. The IRE Process for the Manufacture of Silverbased Composite Contact Materials // Proceedings of the Twelfth International Conference on Electric Contact Phenomena and Thirtieth Annual Holm Conference on Electrical Contacts, sept. 17-21, 1984. - Chicago, Illinois. - 1984. - P. 237 - 242.
108. Miller R. Arc-melted CuCr alloys as contact materials for vacuum interrupters // Siemens Forsch-und Entwicklungsber. - 1988. - 17, №3. - S. 105-111.
109. Neveri J. Possibilities of the Silver Use at the contacts of Power current Switchgear // Proceedings of the Twelfth International Conference on Electric Contact Phenomena and Thirtieth Annual Holm Conference on Electrical Contacts, sept. 17-21, 1984. - Chicago, Illinois. - 1984. - P. 341 - 347.
110. New ceramic based composites for electrical contacts: Pap. Meet. Basic Sci. Sec. Inst. Ceram., London, 18-20 th Dec, 1990 / Illingworth J., Hashemi T., Al-Shahrami A.W. // Brit. Ceram. Proc. - 1992, №49. - P. 241-246.
111. Schröder K. Development of Contact Materials for Power Engineering in Europe // Proceeding of 33 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. - Chicago: Illinois. - 1987. - P. 163-173.

112. Tamai Terutaka. Singularity of contact resistance at very low temperature // IEEE Trans. Compon., Hybrids and Manuf. Technol. - 1986. - 9, №1. - P. 40-45.
113. Taubitz G. Forschung und Entwicklung fur die Kontakttechnik // Elektrotechnik - 1987. - Nr.6. - S.63-65.
114. Turner H. W., Turner C. Contact materials their properties and uses // Part 1, «Electrical Times». - 1967. - 7, (152). - P. 229-233.
115. Watai N., Nishijuma T., Oohashi Y., Fujino T. at all. Development of cooper alloy // Yasaki Techn. Rept. - 1996. - №20. - P. 57-62.
116. Wingert Philip C, Leung Chi-Hund. The development of silver-based cadmium-free contact materials // IEEE Trans. Compon. Hybrids and Manuf. Technol. - 1989. - 12, №1.-P. 16-20.
117. Zhang Ji-Gao, Wen Xia-Min. The effect of dust contamination on electric contacts // Elec. Contacts, 1985. Proc: 31 th Meet. IEEE Holm Conf. Elec. Contact Phenom., Sept.29 - Oct.2 - 1985. - New York. - 1985. - P. 175-179.
118. Павленко Т.П. Дисертаційна робота «Развитие теории эллектрических контактов повышенной дугостойкости для коммутационных эектрических аппаратов» НТУ «Харківський політехнічний інститут» 2012р.
119. Радько І.П., Мархонь М.В.Особливості дослідження міцності зчеплення композиційних контактних матеріалів з зношеними деталями електрообладнання.Журнал «Техніка та енергетика» К..2017. ст.176-186.
120. Радько І. П. Особливості процесів в плазмі при відновленні контактних вузлів Науковий вісний НУБіП України 2016 Випуск Матеріали МНТК «Проблеми та перспективи розвитку енргетики,електротехнологій та автоматики в АПК» М. Київ 20-21.11.2016р.
121. Радько І.П.,- Мрачковський А.М. Investigation of regularities of erosion prototypes electrical contact - details based on silver and copper.Motrol, м.Краків.2016р.№7,стор. 43-48, .
122. Радько І. П. Особливості аналізу фізико-хімічних процесів руху та нагрівання часток у потоці плазми під час відновлення контактних вузлів Науковий вісник.НУБіП. 2016.м. Київ Випуск№242.Ст..164-170
123. Радько І. П. Оцінка терміну служби замкнутих електричних контактів Науковий вісник НУБіП.м. Київ Матеріали МНТК 10-14 травня 2016 р.Ст..73
124. Радько І.П., Мрачковський А.М. Особенности разработки экологически-безопасных контакт-деталей для эллектрических аппаратов НП

Журнал «Инновации в сельском хозяйстве» Москва ВИЭСХ №4(19)/ 2016р.  
Ст..356-362

125. Radko I.P., Chervinsky L.S. The method of indentification and evaluation heating depth details contact swithing devices Науковий вісник

126 Радько І. П., Мархонь М.В.Дослідження міцності зчеплення композиційних контактних матеріалів на зношені деталі електрообладнання. Науковий вісник ТДАТУ, Вип. 15, том 2, 2015, ст.301-309.

127. Радько І. П. Структурні особливості спечених композиційних контактних матеріалів у процесі комутації електричного струму. Науковий вісник НУБІП. 2015.м. Київ Випуск №224.Ст..81-86.

128. Радько І.П. Досліження параметрів електричної дуги при комутації струму відновленими контактами. Науковий вісник НУБІП. 2015.м. Київ Випуск №224.Ст..107-113.

129. Радько І.П. Особливості газоплазменного напилення при відновленні контактних вузлів електричних апаратів. Науковий вісник НУБІП. 2015.м. Київ Випуск №229. ч.2.ст..80-86.

130 Радько І.П. Особливості аналізуфізико-хімічних процесів руху та нагрівання часток у потоці плазми під час відновлення контактних вузлів. Науковий вісник НУБІП. 2015.м. Київ Випуск №242.ст..164-170.

131 I.Radko., V. Nalyvaiko., O. Okushko. Electromagnetic energy as an impact factor on life processes of a biological object of a plant origin / Korean Journal of Food & Health Convergence ( 한국식품보건융합학회지) 6(1), pp.1-8.

<https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO202014254299784.pdf>

