

**Спеціальність «Матеріалознавство»**

**Шифр: «Імпелер»**

**Наукова робота на тему:**

**«Дослідження властивостей покриттів, сформованих енергоефективними методами інженерії поверхонь робочих коліс роторних машин»**

**2019**

## Анотація

Високі вимоги до ресурсних показників роторних машин, на ряду з підвищенням швидкохідності агрегатів, обумовлюють необхідність рішення складних і різноманітних задач, пов'язаних з підвищенням їх надійності і довговічності. Вартість ротора відцентрового компресора, в залежності від параметрів газу, що стискається, коливається від декількох десятків до кількох сотень тисяч доларів США. Робочі колеса піддаються різноманітним видам зносу, що значно впливає на погіршення роботи самого агрегату, втрати продуктивності роботи. Тому на сьогодні є складною проблема підвищення якості ремонту робочих коліс роторних машин. Дійсна робота, пов'язана з вирішенням цього питання, може підвищити надійність та довговічність роботи агрегатів в цілому.

*Метою* роботи є підвищення довговічності робочих коліс насосного та компресорного обладнання за рахунок удосконалення технології зміцнення деталей машин методом електроерозійного легування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні *завдання*: проаналізувати конструктивні особливості робочих коліс; визначити найбільш характерні ділянки зносу робочих коліс; провести порівняльні випробування з метою вибору найбільш раціонального матеріалу легуючого електроду для зміцнення робочих коліс.

*Методика дослідження*. Електроерозійне легування проводилось на установках «Элитрон-22А» та «ЭИЛ – 8А». Оцінка якості шару, його щільність, товщина і будова зо підшару проводилась на оптичному мікроскопі «Неофот – 2». Одночасно замірялась мікротвердість по глибині шліфу на мікротвердомірі ПМТ- 3.

Робота складається із 36 сторінок, 2 розділів, 12 рисунків, 3 таблиць, 42 літературних джерел.

Ключові слова: РОТОРНІ МАШИНИ, РОБОЧІ КОЛЕСА, ВИДИ ЗНОСУ, ДЕТАЛІ, ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНЕ ЛЕГУВАННЯ, ДОВГОВІЧНІСТЬ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ВИСНОВКИ.

**ЗМІСТ**

<b>ВСТУП</b>	4
<b>РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ КОЛІС РОТОРНИХ МАШИН</b>	5
1.1 Загальні положення	5
1.2 Конструктивні особливості робочих коліс.	6
1.3 Умови роботи та види зносу робочих коліс	8
1.4 Конструктивні і технологічні методи підвищення довговічності робочих коліс	11
<b>РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ КОЛІС МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ЛЕГУВАННЯ</b>	14
2.1 Зміцнення і ремонт деталей машин методом електроерозійного легування	14
2.2 Вплив матеріалу електроду, режимів і середовища на структуру і властивості шарів при ЕЕЛ	21
2.3 Методика дослідження	24
Висновки по розділу 2	29
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b>	30
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	31
<b>ДОДАТКИ</b>	35

## ВСТУП

Роторні машини експлуатуються в хімічній, нафтовій і газовій промисловості, в енергетиці, машинобудуванні, на транспорті, харчовій і гірничо-видобувній промисловості, на будівництві і в сільському господарстві.

За останні 20 років парк роторних машин значно застарів, наприклад 60 % турбокомпресорів відпрацювало свій ресурс (100000 годин) і потребує заміни або модернізації. Деякі агрегати мають наробіток більш ніж 200000 годин (це приблизно 30-40 років). Складний і багатофакторний процес фізичного старіння роторних машин – не минутий і об'єктивний, безперервний і природний, хоча інтенсивність його прояву в значній мірі залежить від якості самих машин, їх технічного обслуговування в процесі експлуатації, якості ремонту.

Найбільш відповідальним і дорогим вузлом роторної машини являється ротор. Наприклад, вартість ротора відцентрового компресора, в залежності від параметрів газу, що стискається, коливається від декількох десятків до кількох сотень тисяч доларів США. Між тим саме ротори підлягають явищам зносу і потребують подовження ресурсу.

У свою чергу дуже важливою деталлю ротора є робоче колесо. Робочі колеса підлягають різноманітним видам зносу, що значно впливає на погіршення роботи самого агрегату, втрати продуктивності роботи. Тому на сьогодні є складною проблема підвищення якості ремонту робочих коліс роторних машин. Дійсна робота, пов'язана з вирішенням цього питання, може підвищити надійність та довговічність роботи агрегатів в цілому.

# РОЗДІЛ 1

## ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ КОЛІС РОТОРНИХ МАШИН

### 1.1 Загальні положення

До роторних машин відносяться відцентрові насосні агрегати, відцентрові і гвинтові компресорні агрегати й інше обладнання. Роторні машини експлуатуються в хімічній, нафтовій газовій промисловості, в енергетиці, машинобудуванні, на транспорті, харчовій і гірничодобувній промисловості, на будівництві.

Найбільш відповідальним і дорогим вузлом роторної машини являється ротор. Наприклад, вартість ротора відцентрового компресора, в залежності від параметрів газу, що стискається, коливається від декількох десятків до кількох сотень тисяч доларів США. Між тим саме ротори підлягають явищам зносу і потребують подовження ресурсу.

Робочі колеса підлягають різноманітним видам зносу, що значно впливає на погіршення роботи самого агрегату, втрати продуктивності роботи. Тому на сьогодні є складною проблема підвищення якості ремонту робочих коліс роторних машин. Вирішення цього питання може підвищити надійність та довговічність роботи агрегатів.

### **Класифікація насосного та компресорного обладнання**

За принципом дії [1] поділяють на: поршневі; гвинтові; відцентрові; осьові; струменеві. Класифікація насосного й компресорного обладнання показана на рис. 1.1.

Газові машини використовуються для стиснення, або перекачування любого газу чи газової суміші, крім повітря; в залежності від виду газу вони називаються кислородними, водневими, аміачними і т.д.

Повітряні використовуються для стиснення повітря; значну групу таких машин складають машини загального призначення, призначені для

стиснення атмосферного повітря до тиску 0,8-1,5 МПа і виконання без врахування будь-яких специфічних вимог.



Рисунок 1.1- Класифікація насосних і компресорних машин

Циркуляційні машини призначені для забезпечення циркуляції газу в замкнутому технологічному контурі.

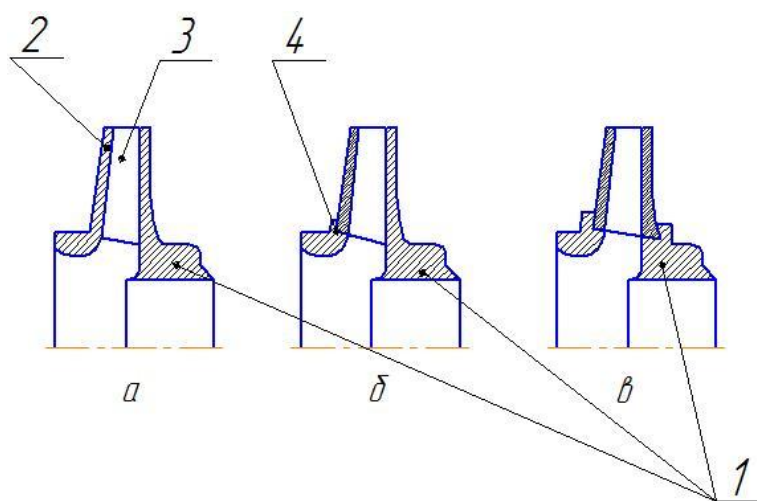
Спеціальні машини призначені для поперемінного стиснення чи перекачування різних газів.

## 1.2 Конструктивні особливості робочих коліс

Основними елементами роторних машин являються: робоче колесо з лопатками, і дифузор. Газ, що знаходиться між лопатками, при обертанні колеса отримує обертальний рух. Під дією центр обіжної сили газ переміщується до периферійної зони колеса. Потім газ попадає в дифузор,

площа якого збільшується зі збільшенням радіуса, швидкість газу знижується, а тиск збільшується. Для підвищення ефективності роботи дифузора по перетворенню кінетичної енергії в потенціальну призначені лопатки, що впорядковують рух газу.

Більшість коліс (рис. 1.2) складається із основного 1 і додаткових дисків



*Рисунок 1.2 - Конструктивні особливості робочих коліс*

*а – цільно-ковані; б – основний диск цільно-кований, покривний – штампований; в – мають два складових диски.*

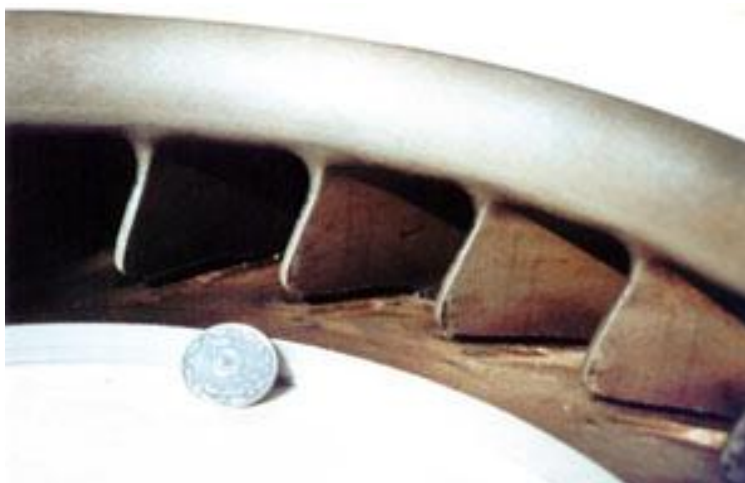
*1 – основний диск; 2,4 – додаткові диски; 3 – лопатки.*

2 і 4, а також лопаток 3. Колеса виконують цільно-кованими при кутових швидкостях 200-300 м/с. При менших швидкостях застосовують комбіновані колеса, у яких основний диск – цільно-кований, а той що покриває – штампований з посиленою ступицею. В деяких випадках колеса, мають два складових диски. Такі колеса використовуються при швидкостях менше 150 м/с.

Якщо як робоче середовище застосовується газ, що не володіє корозійною активністю, то як матеріал робочих коліс застосовують вуглецеві сталі, а при використанні агресивних робочих середовищ робочі колеса виготовляють із легованих і хромонікелевих сталей марок 30ХГС, Х15НЮА, 07Х16Н6 і т.п.

### 1.3 Умови роботи та види зносу робочих коліс

В більшості випадків робочі колеса виходять з ладу по причині **ерозійного** зносу їх лопаток (рис. 1.3). Механізм зносу полягає в тому, що



*Рисунок 1.3 - Ерозійний знос лопаток робочих коліс*

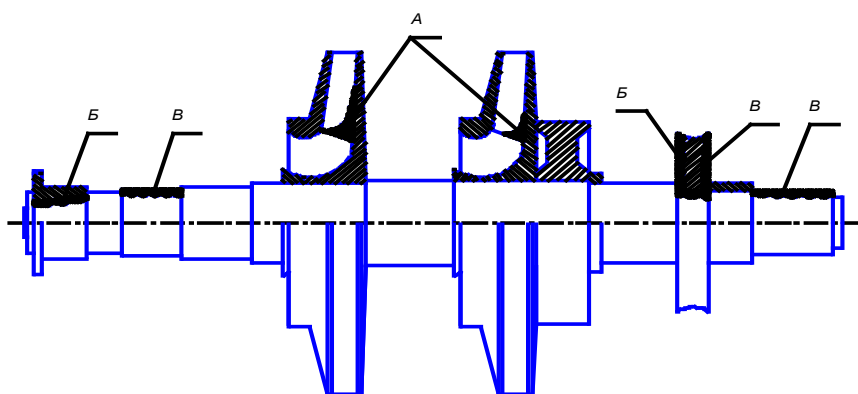
потік газу, що поступає на вхідну воронку колеса, здійснює поворот на  $90^{\circ}$ . На частинки газу діє відцентрова сила, що відкидає механічні частинки більш важки бо втулкової частини робочого колеса, при цьому лінійна швидкість і момент кількості руху часток збільшується. Вдаряючись із вхідною крайкою лопаток колеса, абразивні частинки викришують часточки металу із верхнього шару лопаток, утворюючи каверни, які, розвиваючись в часі, призводять до значного викришування металу у вигляді прорізів. Відомі випадки, коли робочий диск повністю відрізається від частини колеса, що призводить до тяжких аварій, як правило, при помітних зношуючих явищах на першому робочому колесі має місце знос крайок і на наступній ділянці коліс, але в меншій мірі.

Ерозійний знос особливо сильно відображається на аеродинамічних властивостях вхідної крайки лопатки. Після деякого часу роботи в умовах запиленого потоку початковий профіль вхідної крайки лопатки перетворюється в загострений. На випуклих (робочих) поверхнях лопаток часто з'являється значні заглиблення, що виникають біля основного диска значно далі від входу, ніж в іншій частині лопатки по її ширині. Також



заглиблення утворюються в області вихідної ділянки поблизу основного диска [2]. Інколи в цих місцях з'являється наскрізний проріз тіла лопатки, як показано на рис 1.6.

**Зношування фретинг-корозії** (рис. 1.4) виникає при малих коливальних, циклічних, зворотно-поступальних переміщеннях з малими амплітудами, для виникнення фретинг-корозії достатні переміщення поверхонь з амплітудою 0,025 мкм.



*Рисунок 1.4 - Схематичне зображення найбільш характерних місць зносу деталей ротора*

Зона А – газоабразивний знос вхідних крайок лопаток робочого колеса має місце при недостатній фільтрації газу перед входом в компресор, що призводить до наявності в газі абразивних механічних часток, викликаючи викришування часточок металу лопаток.

Зона Б – фретинг-корозія в місцях посадок з натягом деталей на вал. Цій корозії підлягають внутрішні поверхні упорного диска, робочого колеса, з'єднуючої пів муфти.

Пошкодження від фретинг-корозії залежать від багатьох факторів: амплітуди відносного проковзування, контактного тиску, кількості циклів, частоти коливань, матеріалу і оточуючого середовища.

Фретинг-корозія присутня в заклепкових, болтових, шліцевих, шпонкових, штифтових з'єднаннях пресових посадках деталей.

Не дивлячись на значну відмінність якісних параметрів контактуючих поверхонь деталей, що підлягають фретинг-корозії, можна виділити дві групи спряжень, які мають загальні конструктивні особливості [11]:

1. Спряження, у яких відносний рух поверхонь не передбачено конструкцією вузла (болт-втулка).
2. Спряження, у яких відносний рух передбачено конструктивно (пружні елементи).

Таким образом, аналіз літературних джерел показує відсутність єдиного механізму захисту від фретинг-корозії. Фретинг-корозію деталей можна зменшити або повністю виключити, змінюючи якісні параметри їх верхніх шарів, наприклад, нанесенням корозійностійких захисних покриттів потрібної твердості, товщини і коефіцієнта тертя.

**Абразивний знос.** У сумарному об'ємі всіх видів зносу десь 80-90% припадає на долю абразивного, який виникає при терті деталей об тверді тіла і частини. В цьому випадку поверхня тертя пошкоджується в результаті роботи абразивних частинок, що деформують мікро об'єми металу верхніх шарів. На абразивний знос впливають форма і властивості абразивів і металевих поверхонь [3-8].

**Кавітаційне зношування** типове для деталей машин, що працюють в рідинних середовищах. Кавітаційний знос металевих тіл має вид видавлених кратерів, що періодично в процесі роботи деталей.

Різні види зміцнення верхнього шару (поверхневе закалювання, азотування, цементація, хромування, тверді наплавлення) значно знижують кавітаційне зношування.

**Втомлюване зношування** виникає при повторній деформації мікро об'ємів верхнього шару деталі і супроводжується утворенням тріщин і відокремлення частинок матеріалу [9].

Наявність вільної вологи, коли її загальний вміст в мастилі перевищує межу розчиняє мості, стимулює протікання мікробіологічних процесів, що призводять до старіння нафтових мастил [10]. У вільній воді з'являються

мікроорганізми, які живляться мастилом і розмножуються в колонії, захоплюючи всю поверхню вільної води. Продуктами їх життєдіяльності являються кислоти, які знижують рН води і мастила, формують агресивне і кисле середовище. Мікроорганізми, що гинуть, утворюють високомолекулярні білкові з'єднання, які разом з продуктами реакції кислого середовища з металами породжують можливість виникнення біоемульсій, які випадають у вигляді шламу. Шлам, у свою чергу, різко знижує ефективність роботи турбінного мастила як охолоджуючого середовища в ущільненнях і підшипниках.

**Корозійно-механічне зношування** відбувається при терті матеріалів, що вступають в хімічну взаємодію із середовищем. Чиста металічна поверхня легко підтягається хімічній дії середовища, однак якщо в процесі початкової корозії продукти її утворюють міцно зв'язану з металом плівку, що ізолює поверхню від корозійного середовища, то метал набуває пасивності по відношенню до неї. Процес штучного утворення тонких окисних плівок на поверхні металу для захисту його від корозії і надання виробу кращого виду називають пасивіруванням.

#### **1.4 Конструктивні і технологічні методи підвищення довговічності робочих коліс**

Для підвищення довговічності взаємодіючих деталей застосовуються різні технологічні способи їх зміцнення. До основних із них відносяться: термічна, хіміко-термічна, фізико-хімічна обробка робочих поверхонь деталей, поверхневе деформування, гальванопокриття, металізація напилюванням і наплавлення поверхонь, електроерозійне легування.

**Поверхневе закалювання** відрізняється від хіміко-термічної обробки меншим продовженням процесу. Існує кілька методів поверхневого закалювання (в розплавлених металах або шарах, пламеневе закалювання, електрострумом високої частоти), однак всі вони заключаються в нагріві тільки верхнього шару з наступним закалюванням деталі [12].

Одним із напрямлень збільшення опору тертю і зношуванню деталей являється створення на їх верхніх шарах хімічних з'єднань, властивості яких відрізняються від властивостей основних металів. До такої категорії методів підвищення зносостійкості металів відноситься хіміко-термічна обробка, при якій на поверхні металів утворюється сполуки з вуглецем, азотом, сіркою й іншими хімічними елементами. Ці методи обробки, отримали назву: цементация, азотування, ціанування, борирування, хромування і ряд інших, останнім часом знаходять застосування в машинобудуванні переважно для покращення протизадирних і антифрикційних якостей деталей машин, які працюють в тяжких умовах тертя, коли наявна небезпека заїдання.

При **цементації**, в результаті насичення верхнього шару виробу вуглецем, отримуємо високо вуглецевий поверхневий шар. Застосовують, як правило, низько вуглецеву сталь (до 0,3% C) і потім піддають її загартуванню. В результаті утворюється твердий поверхневий шар (0,5-2,5 мм) і м'яка серцевина [13].

**Азотуванням** називають дифузійне насичення азотом поверхонь сталевих і титанових деталей. Після азотування деталі незначно збільшуються в розмірах. Процес азотування проводять при температурі 500-600°С на готових деталях, що пройшли фінішну термообробку, і доводять до кінцевого розміру поліруванням або шліфуванням. З легуючими елементами деталей (хром, молібден, ванадій і алюміній) азот утворює тверді і стійкі нітриди. Найбільшу твердість азотному шару надає легуючий елемент деталей – алюміній.

**Борирування** – процес дифузійного насичення поверхні металу з'єднаннями бору у вигляді боридів заліза  $Fe_2/B$  або  $Fe/B$ . Застосовують для підвищення зносостійкості виробів, в тому числі працюючих при підвищених або понижених температурах, знакоперемінних і ударних навантаженнях або в агресивних і абразивних середовищах.

**Гальванопокриття** (хромування, нікелювання) застосовують для деталей із зносом від декількох мкм до 1,5 мм. Хромування як процес

відновлення і підвищення зносостійкості поверхонь тертя займає одне із перших місць. Покриття із електролітичного хрому володіють високою твердістю, що пояснюється, головним чином, мілко зернистою структурою і особливістю кристалізації його на катоді [14,15].

**Металізація** напилюванням заключається в розпиленні розплавленого металу струменем стисненого повітря і осаді його на попередньо підготовлену поверхню деталі. В якості напиленого матеріалу застосовують дріт із сталі, бронзи, латуні, алюмінію.

Не дивлячись на те, що процес металізації напилюванням відрізняється простотою продуктивністю поверхонь деталей широке розповсюдження отримав процес **детонаційного нанесення покриттів**. Нанесення покриттів за допомогою детонаційної гармати являється різновидом методу термічного напилювання з нагрівом і направленим викидом часточок порошку на підкладку із камери згорання потоком газу, що виникає при детонаційному згоранні [16, 17].

**Лазерне термозміцнення** поверхні деталі являється перспективним процесом, що дає ряд можливостей підвищення експлуатаційних якостей деталей і інструменту. Метод заснований на використанні явища високошвидкісного розігріву металу під дією лазерного променя до температур, що перевищують температуру фазових перетворень, але нижче температури плавлення і наступного високошвидкісного охолодження за рахунок тепла з поверхні в основну масу металу [18].

## РОЗДІЛ 2

### УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ КОЛІС МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ЛЕГУВАННЯ

#### 2.1 Зміцнення і ремонт деталей машин методом електроерозійного легування

Метод ЕЕЛ був розроблений Б.Р. Лазаренко і Н.І. Лазаренко в 1943 році одночасно з методом розмірної електроерозійної обробки [25, 26].

Процес ЕЕЛ починається зі зближення електрода-інструменту з деталлю, і при відстані між ними, що дорівнює або менше пробивного, починається розвиток імпульсного розряду, який в більшості випадків продовжується і завершується при контакті електродів. Модель ЕЕЛ [27] представляється наступним образом (рис. 2.1).

При зближенні електродів напруженість електричного поля збільшується. При деякій відстані між електродами вона буде достатньою для виникнення електричного розряду. Через виникаючий канал наскрізної провідності пучок електродів вдаряється у тверду металеву поверхню анода (рис. 2.1 а). енергія руху зупинених електронів виділяється у верхніх шарах аноду. У зв'язку з тим, що в даний момент система стрибкоподібно звільнює накопичену енергію, щільність струму значно перебільшує критичне значення. В результаті цього від анода відділяється краплина розплавленого металу, яка рухається по катоду, випереджаючи рухомий анод (рис.2.1 б).

У процесі відокремлення анода крапля встигає нагріватися до високої температури, закипає або «вибухає». Ланцюг струму переривається, стискувані зусилля електромагнітного поля зникають і того утворені частинки летять широким фронтом (рис. 2.1 в). Так перегріта крапля і частинки в стикаючись з газом (робоче середовище), то по складу і властивостям можуть відрізнитися від вихідного матеріалу аноду.

Розплавлені частинки, досягнувши катода, зварюються з ним і частково проникають в його поверхню (рис 2.1 г). Вслід за частинками рухається електрод, ввімкнений в систему, яка вже накопила енергію. Через розкалені частинки, що лежать на катоді, проходить другий імпульс струму, що

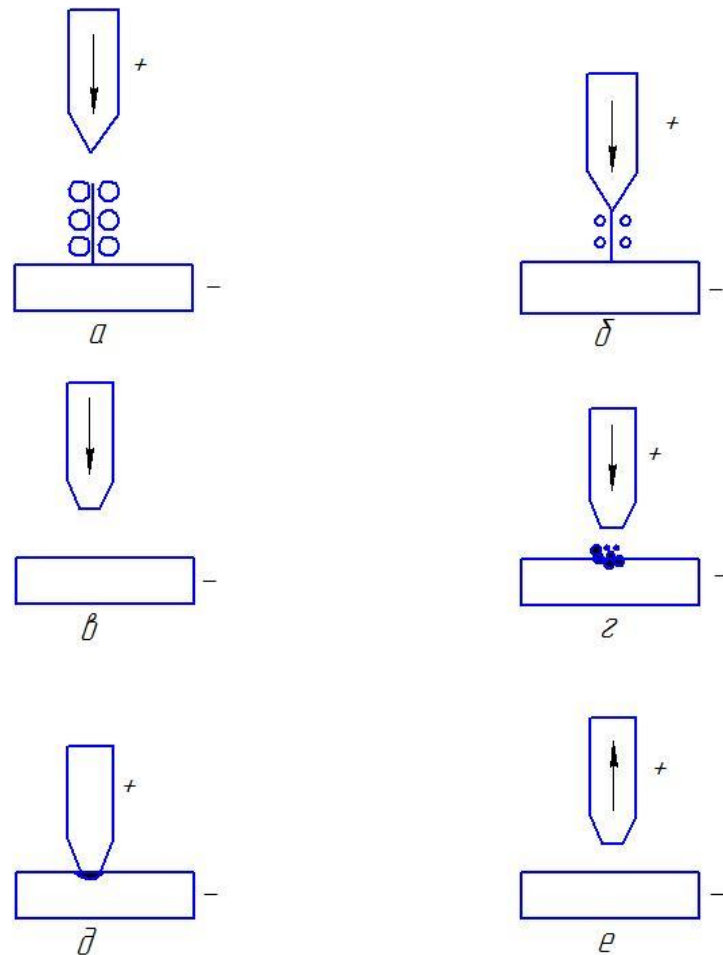


Рисунок 2.1 – Модель процесу ЕЕЛ

супроводжується механічним ударом рухомого електрода (анода). На наступному етапі при механічному контакті електродів частинки зварюються між собою, і прогрівається тонкий шар поверхні катода. При цьому крім дифузійного масо-переносу під дією електричного струму в тілі катода відбуваються хімічні реакції між частинками, що наносяться і матеріалом катода. Механічний удар електрода покриття (рис. 2.1 д), що значно збільшує його однорідність і щільність. Далі анод рухається в гору, а на поверхні катода залишається щільно з'єднаний з ним матеріал анода (рис. 2.1 е).

Із представленої загальної схеми процесу необхідно уточнити наступні положення. При зближенні електродів між ними проходить електричний розряд, миттєвий розігрів між електродного простору, розвиток плазмової стадії розряду, при якій можливе існування речовини в іонізованому стані. Частинки матеріалу, що викинутий з аноду, вдаряється по поверхні катода, прилипає. В результаті деформації розплавленого металу і дії електродинамічних сил, що виникають у мікро ванні, на поверхні катоду утворюється лунка. Розмір лунки і кількість перенесеного матеріалу залежать від електроерозійної стійкості матеріалу електрода й енергії імпульсу. Матеріал мікро ванни і поступаючи частинки утворюють шар покриття.

Не дивлячись на коротку тривалість дії одиничних імпульсів. Загальну невисоку температуру катода, дуже високу швидкість охолодження верхнього шару, у верхніх шарах катода можуть відбуватися і дифузійні процеси. Дифузійний шар виникає в результаті дуже швидкого нагріву, високого тиску, що розвивається в каналі розряду в точці його виникнення і багатократних уніполярної й імпульсної дії електричного поля досить високої напруги [28, 23]. Крім того, матеріал мікро ванни вступає у взаємодію і з елементами оточуючого середовища. Тому склад шару і його фізико-хімічні властивості часто значно відрізняються від властивостей легуючого і легованого матеріалів [28].

Руйнування електродів – один з найбільш важливих наслідків іскрового розряду. Інтенсивність і характер руйнування електродів багато в чому визначають товщину і якість отриманого на катоді шару. Для більшості матеріалів товщина формованого на катоді шару обмежена. Затверджується [23], що в процесі електроерозійного легування з протіканням часу сповільнюється і припиняється осідання матеріалу анода, а не ерозія і його викид. Це пов'язане з утворенням окисів і нітратів у шарі, які перешкоджають взаємодії знову поступаючи на катод порцій матеріалу анода, з раніш нанесеним і призводить до руйнування сформованого шару. Інколи обмежені товщини сформованого шару зв'язуються [29] з його



крихкостями за рахунок утворення мілко кристалічної структури під дією імпульсних розрядів. Із аналізу даних вимірювань приросту ваги і залишкових напружень слідує, що з ростом питомої тривалості легування рівень залишкових напружень у формованих шарах спочатку зростає до визначеної величини, а потім зменшується. З визначеного моменту хоча процеси переносу і росту покриття на катоді ще продовжуються, на верхні шари вже робляться крихкими за рахунок утворення мілко зернистої структури і виникнення крихких фраз при взаємодії матеріалу електроду з оточуючим середовищем. При цьому мікро тріщини, що з'явилися, сприяють руйнуванню частини сформованого покриття і релаксації залишкових напружень [23]. Наявність деякої товщини сформованого шару розглядається [30] як наслідок вичерпання енергоємності металу при багатократній деформації в контакті з поверхнево-активним розплавом, що надає дію крихкості. Динаміка формування поверхневих шарів характеризується тим, що інтенсивність переносу максимальна в перші хвилини процесу, далі вона зменшується.

В кінцевому висновку при визначених значеннях енергії розряду перенос заміняється ерозією вже нанесеного шару, і приріст ваги становиться негативним. Таким чином, фізико-хімічна природа структуроутворення верхнього шару при електроерозійному легуванню обумовлює великі труднощі вибору технологічних параметрів процесу.

У цей час розрізняють два напрямлення електроерозійного легування: чистове і грубе. При чистовому на катоді (деталі) формуються відносно тонкі до 0,1 мм і якісні шари з висотою нерівностей профілю покриття  $R_z$  не більше 40 мкм, при грубому товщина формованого шару може досягати 0,15-0,2 мм і більше з  $R_z > 80$  мкм. Хоча традиційно розрізняють установки для чистого і грубого легування, існує ряд установок, які можуть застосовуватися застосовуватися як для першого, так і для другого випадків, наприклад «Елітрон» (рис. 2.2).



*Рисунок 2.2 – Установка «Элитрон – 52 А», призначена для чистового і грубого ЕЕЛ*

Грубе легування використовують для зміцнення поверхонь, до шорсткості яких не пред'являються високі вимоги, з товщиною легованого шару більше 100 мкм. Це велика номенклатура деталей катаного виробництва, що працюють в умовах інтенсивного зношування, деталі автомобілів, тракторів.

Майже у всіх випадках для електроерозійного легування використана схема з ємнісним накопичувачем енергії якимось електромеханічним пристосуванням, що замикає розрядний контур. Найбільш універсальним пристосуванням для кріплення анода – електрода являється звичайний електромагнітний вібратор. В даному випадку комутація між електродного зазору здійснюється за рахунок вібрації анода. При цьому анод, здійснюючи коливальний рух із частотою 50-400 Гц, періодично контактує з поверхнею катода. Гнітуче число установок, що випускаються в наш час, для електроерозійного легування при приведеній схемі.

На рис. 2.3 у спрощеному вигляді показана схема установки ЕЕЛ [20].

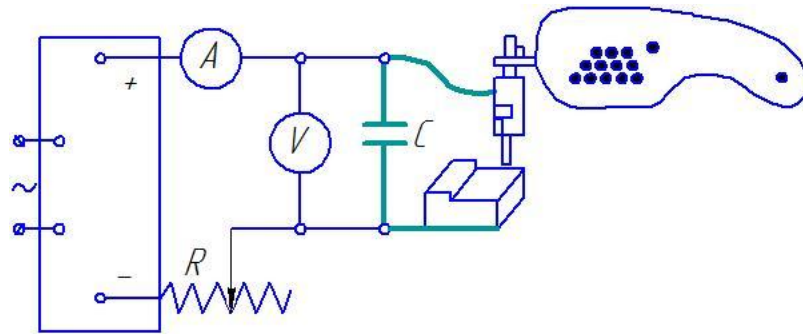


Рисунок 2.3 – Принципова електрична схема установки ЕЕЛ металевих поверхонь

У таблиці 2.1 приведені основні технічні характеристики установок з ручним вібратором, розроблених в країнах ближнього і дальнього зарубіжжя. Ці установки в основному призначені для зміцнення поверхонь деталей, метало ріжучого і штампованого інструменту.

**Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики установок ЕЕЛ з ручним вібратором**

Тип установки	Країна – виробник	Товщина покриття, мм	Продуктивність см <sup>2</sup> /хв	Кількість режимів	Висота мікронерівностей, мкм	Маса, кг
ЭИЛ-8А	Україна	0,01-0,08	2-6	18	10-50	14
Элитрон-22	Молдова	0,01-0,12	До 5	6	16-80	22
Элитрон-52	Молдова	0,01-0,2	До 9,9	15	8,5-155	120
Tucadur 2000	Італія	0,002-0,04	1-3	Нема даних	До 20	14,4

У монетному виробництві найбільш широко використовують переносні установки з ручним вібратором моделей «ЭИЛ – 8А» і «Элитрон – 22 А» (рис. 2.4 і 2.5), які не значно відрізняються конструктивними особливостями і практично не відрізняються діапазоном використовуваних режимів роботи. Установки компактні, малогабаритні, зручні в транспортуванні

(виготовляються в переносному варіанті) і пристосовані для роботи в любых виробничих умовах.



*Рисунок 2.4 – Установка „Элитрон – 22А”*



*Рисунок 2.5 – Установка „ЭИЛ – 8А”*

Суттєвим недоліком установок ЕЕЛ з ручним вібратором являється низька продуктивність (до  $6 \text{ см}^2/\text{хв.}$ ), що для обробки великогабаритних деталей не завжди достатньо. Прагнення підвищити продуктивність процесу ЕЕЛ призвело до створення різноманітних конструкцій головок електротримачів і форм електродів: дротових, щіткових, із жорстким і гнучким кріпленням електродів, багато електродних обертових головок.

## **2.2 Вплив матеріалу електроду, режимів і середовища на структуру і властивості поверхневих шарів при ЕЕЛ**

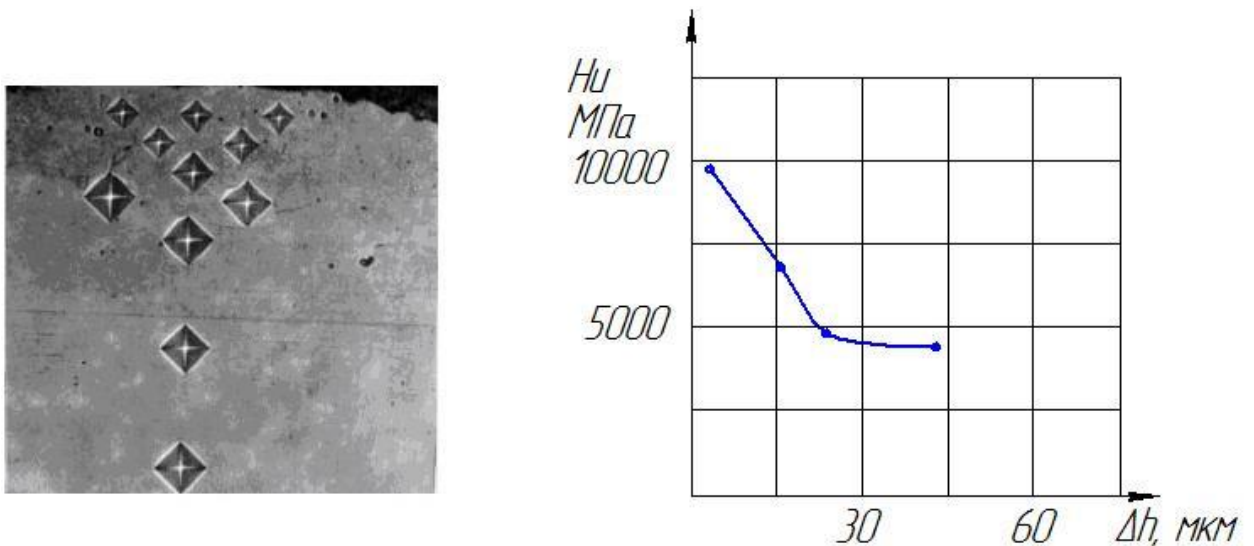
У процесі ЕЕЛ на поверхні анода і катода утворюється шар зміненої структури, який при дії на нього «травителів», використовуваних для виявлення мікроструктури матеріалів електродів, залишається «білим», структура його не виявляється. Подібні шари спостерігалися на поверхнях матеріалів, що підлягають шліфуванню, точінню, електромеханічній обробці, обробці шариками, на поверхнях тертя після дії висококонцентрованих потоків енергії. Загальним для всіх указаних випадків являється те, що утворення «білих» шарів відбувається в умовах локально дії високих температур і тисків. По інтенсивності дії на верхній шар ЕЕЛ значно відрізняється від перерахованих вище процесів. Висока швидкість тепло відведення призводить до того, що в межах товщини шару порядку декількох мікрометрів температура швидко падає до температур плавлення і відповідних фазових перетворень. В зв'язку з цим кристалізація, фазові перетворення, дифузія і хімічна взаємодія, що супроводжують процес ЕЕЛ., призводять до утворення вкрай нерівномірних структур з дуже мілким зерном. Твердість такого шару, як правило, значно перевищує твердість матеріалів електродів (рис. 2.6). в ньому діють напруження, переважаючи внутрішні напруження в електродних матеріалах анода і катода [24].

Загальний шар ЕЕЛ має дві зони [23,27]:

- верхній шар (білий), не травиться і здається однорідним;
- нижній перехідний шар дифузійного характеру.

У більшості випадків дифузійний шар по глибині перевищує верхній шар, а глибина проникнення елементів аноду в катод може складати від декількох до ста мікрометрів.

Крім того, спостерігають часто третю зону – зону термічного впливу (ЗТВ) для загартованих деталей підшар може виявитися зоною відпуску (зоною пониженої твердості). Глибина цієї зони залежить від енергії розряду.



*Рисунок 2.6 – Мікроструктура та розподіл мікротвердості в поверхневому шарі сталі 45, легованої твердим сплавом ВК8.*

Структурні комплексні і фазові перетворення в поверхневому шарі сталі проходять не тільки при використанні електродів складних з єднань, але і однойменних з катодом матеріалів. Так, при ЕЕЛ сталі 45 той же самою сталлю в поверхневому шарі формується мартенситна структура, що характеризується високою щільністю дефектів кристалічної будови, подібне загартуванню сталі із рідкого стану [31].

Характер взаємного розподілення елементів у поверхневих шарах при ЕЕЛ говорить про високу рухомість атомів в кристалічній решітці матеріалів, що підлягають дії імпульсних розрядів [32, 33]. Подібні явища спостерігаються при взаємодії на тверде тіло факелу іскрового розряду [34], лазерного випромінювання [35, 36] й інших локальних енергетичних взаємодій.

Методом електрохімічного травлення встановлено, що структура білого шару при зміцненні сталі 30ХГС ферохромом являє собою хромистий ферит з витягнутими до поверхні зернами, по межах яких розміщені дисперсні виділення карбідів і нітритів [37].

Згідно [38] у всіх випадках легування залізної підкладки перехідними металами відбувається значна зміна структури підшару з її діленням, що

обумовлюється виявленням нагріву тонкого шару до температури алотропічного перетворення і переходу крупнозернистої  $\alpha$ - фази в мілко зернисту  $\gamma$ - фазу.

Найбільше зміцнення мікротвердості при ЕЕЛ досягається електродами з високою твердістю за рахунок їх осадження на поверхні катода, причому формовані шари можуть мати мікротвердість вище, ніж сам нанесений матеріал так, при ЕЕЛ сталі 45 твердим сплавом Т15К6 мікротвердість шару досягала 32000-36000 мПа, хоча твердість твердого сплаву – 26000МПа, що пояснюється утворенням карбідів вольфраму і титану [39].

Важливим слідє рахувати, що при ЕЕЛ навіть м'якими матеріалами, наприклад, алюмінієм, вдається значно підвищити мікротвердість оброблюваної деталі, так, висока мікротвердість шару (12000-1400МПа) при ЕЕЛ титану алюмінієм і нікелем пояснюється утворенням нітритів, окисів [39].

При дослідженні впливу режимів установок чистового легування типу «ЭИЛ – 8 В» і «Элитрон – 22 А» на структуру і властивості формованих покриттів нами в [40] встановлено, що для забезпечення якісного покриття необхідно правильно вибрати найбільш раціональний час легування. Воно повинно бути декілька меншим або рівним часу, за який досягається максимальним приріст ваги на катоді, і меншим від часу, при якому починає руйнуватися сформований шар.

Тривалість легування на одному режимі не впливає на показник шорсткості, а визначає кількість перенесеного матеріалу з аноду на катод, щільність і товщину покриття. Зі збільшенням тривалості ЕЕЛ зростає кількість перенесеного матеріалу з анода на катод, збільшується щільність і товщина покриття.

При ЕЕЛ перевагу слідє віддавати неперервному легуванню, що забезпечує в порівнянні з циклічним великий приріст на катоді.

Найбільш раціональним режимом для більшості виконуваних твердих зносостійких матеріалів являється режим, коли струм короткого замкнення

$J_{кс} = 2,1$  А, напруга холостого ходу  $U_{xx} = 68,7$  В при ємності накопичую чого конденсатора 300 мкФ, що забезпечує в поєднанні з великою товщиною білого шару (25-30 мкм) відносно високу мікротвердість як білого шару ( $H_m = 7500-12000$  МПа). Найбільш раціональний час легування становить 1-2 хв/см<sup>2</sup>.

### 2.3 Методика дослідження

Підвищення стійкості робочих коліс насосів, компресорів і повітродувок від газоабразивного, немеханічного й інших видів зносу, розроблена технологія по їх зміцненню ЕЕЛ.

Вище згадувалось, що для зміцнення робочих коліс в окремих випадках застосовуються шликерні покриття. Відоме зносостійке шликерне покриття, в якому наповнювачем служить тврдосплавна суміш ВК6, а легко сплавним зв'язком – твердий розчин системи Ni – Cr – Si – В. Покриття наносять на робочі поверхні деталей шликерним методом з наступним відпалом у вакуумі. Кращу зносостійкість проти ерозійного зносу показали зразки зі сталі 30ХГСА з покриттям складу 10% 1М + 90% ВК6, де 1М – 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В. Твердість нанесеного шару покриття 85 – 86 НРА (1050 – 1100 НV). Недоліками таких покриттів являються трудомісткість і вартість їх отримання.

Нами досліджувалась можливість застосування вищевказаного матеріалу в якості електродів для ЕЕЛ.

Переваги ЕЕЛ перед шликерним методом отримання зносостійких покриттів очевидні:

- 1) ЕЕЛ можна здійснювати в строго визначених місцях радіусом від долів міліметра і більше, на захищаючи при цьому іншу поверхню деталі;
- 2) при ЕЕЛ відсутній об'ємний нагрів деталі, отже, короблення;
- 3) тривалість процесу ЕЕЛ вимірюється у хвилинах, а шликерного – в годинах.



Із ціллю застосування в якості електродів при ЕЕЛ нових композиційних зносостійких матеріалів, отриманих за допомогою порошкової металургії, досліджувались матеріали, що складаються із тонко дисперсної суміші 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В) і ВК6. Суміш 1М готувалася із тонко дисперсних порошків Ni, Cr, Si, В з розмірами часточок не більше 40 мкм. Порошки просушувалися в сушильних шафах при 150 - 200°С, просіювалися через сито 0075, завантажувалася необхідна їх кількість відповідно рецептурі в спеціальний змішувач і проводилося механічне змішування на протязі 24 годин.

Для приготування суміші ВК6 використовувалась готова твёрдосплавна суміш типу ВК6, вона просушувалася у вакуумі з розрідженням не менше  $1 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст. при 150°С, потім просіювалася через сито 0076. після того як твёрдосплавна і самофлюсуюча суміші готові, їх завантажили у змішувач і піддавали спільному механічному змішуванню на протязі 24 годин у наступних відношеннях: 100%1М; 50%ВК6; 50%ВК6 + 50%1М; 60%ВК6 + 40%1М; 70%ВК6 + 30%1М; 80%ВК6 + 20%1М; 90%ВК6 + 10%1М; 100%ВК6.

Указані суміші змішувалися із пластифікатором (5% розчин синтетичного каучуку в бензині). Заготовки необхідних розмірів пресувалися у формах , які потім спікалися при 1400 - 1500°С в захисній атмосфері (водень) в печі любої системи, що дозволяє забезпечити задану температуру.

Виготовленими таким чином електродами проводилось ЕЕЛ зразків зі сталі 45 на установці «ЕІЛ – 8А» на 5-му режимі ( $J_{RP} = 2,0 - 2,2A$ ;  $U_{XX} = 68,7B$ ;  $C = 300$  мкФ). Оцінка якості шару, його щільність, товщина і будова зо підшару проводилась на оптичному мікроскопі «Неофот – 2». Одночасно замірялась мікротвердість по глибині шлифу на мікротвердомірі ПМТ- 3 вдавлюванням алмазної піраміди під навантаженням 0,05Н.

Результати металографічних випробувань цих покриттів зведені в таблиці 2.2 і показані на рис. 2.7.

Таблиця 2.2 – Результати металографічних досліджень зразків із сталі 45 з ЕЕЛ

Матеріал зразків	Матеріал покриття	Товщина шару, мм	Мікротвердість $H_{\mu}$ , МПа	Щільність, %
Сталь 45	50%ВК6 +50%1М	5-50	8900	75
Сталь 45	60%ВК6 +40%1М	5-45	11500	70
Сталь 45	70%ВК6 +30%1М	10-25	12300	70
Сталь 45	80%ВК6 +20%1М	До 40	13250	75
Сталь 45	90%ВК6 +10%1М	До 40	14200	80
Сталь 45	100%1М	40-75	8350	60

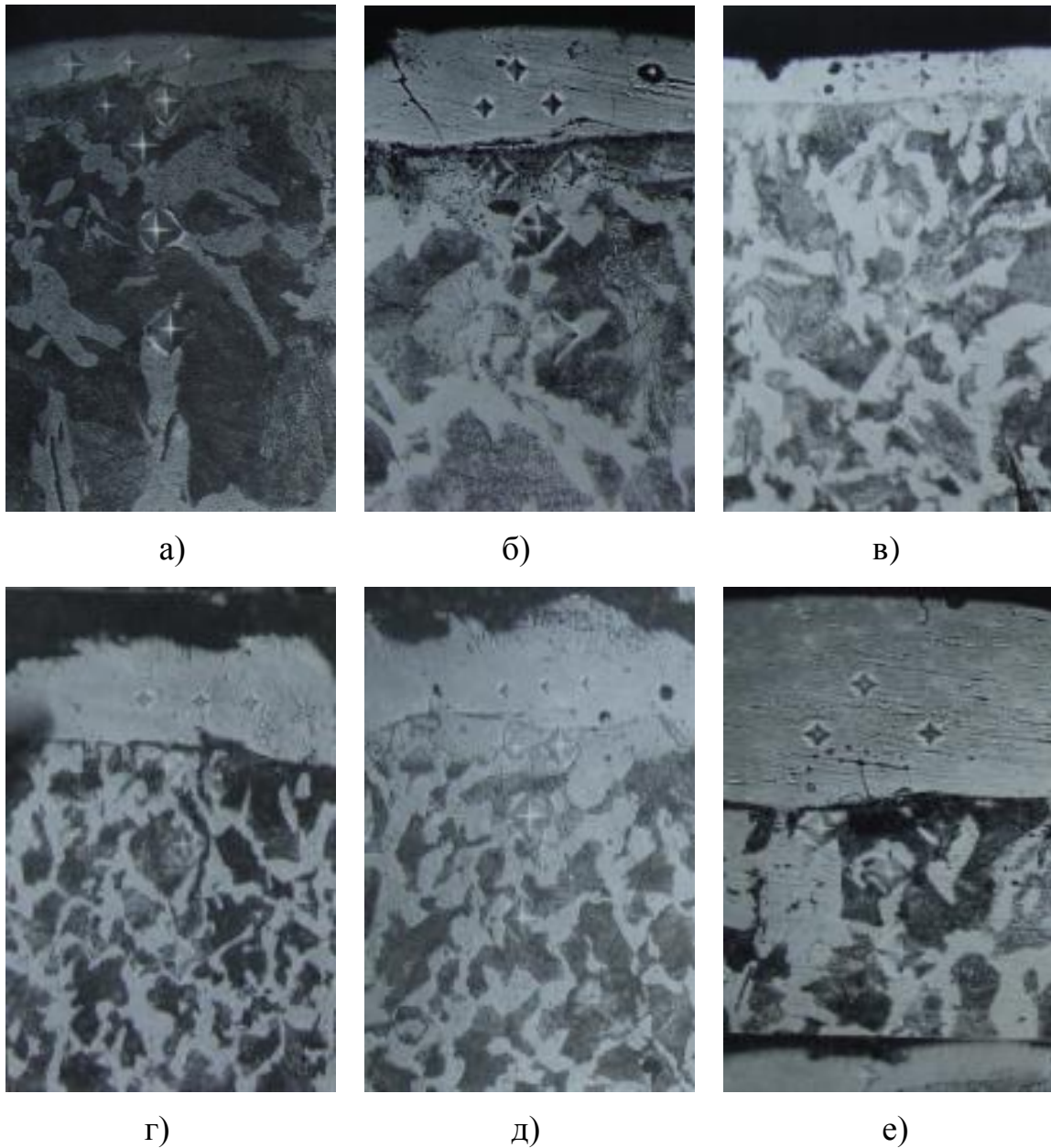
Найбільш переважачим являється застосування електродів із матеріалу складу 90%ВК6 + 10%1М, що дозволяють формувати поверхневий шар з мікротвердістю до 14000 МПа і більше.

Слідє відзначити, що ЕЕЛ електродами, виготовленими із сплаву 1М, дозволяє формувати відносно товсті покриття (до 75 мкм) з мікротвердістю до 8350 МПа.

Таким чином, порошкова металургія дозволяє нам виготовляти електродні матеріали необхідного складу і з високими експлуатаційними властивостями при ЕЕЛ.

#### **Дослідження ерозійної стійкості покриттів, сформованих ЕЕЛ**

Із ціллю вибору покриття для захисту робочих коліс від газоабразивного зношування проводилися лабораторні дослідження



*Рисунок 2.7 – Мікроструктура поверхневого шару сталі 45 з композиційними покриттями складу:*

*a – 50% 1M + 50% BK6; б – 40% 1M + 60% BK6; в – 30% 1M + 70% BK6; г – 20% 1M + 80% BK6; д – 10% 1M + 90% BK6; e – 100% 1M*  
 покриттів різних типів на зразках розміром 100 x 50 x 6 мм, вирізаних із листової сталі 30 ХГС.

В якості електродів застосовувався матеріал, що складається із твердосплавної суміші BK6 і суміші 1M, взятих у співвідношенні 90% BK6 і 10% 1M, що показав найкращий результат по мікротвердості (14500 МПа).

Для порівняння досліджувалися покриття із твердих сплавів ВК6, Т15К6 і сплаву 1М.

Зразки, як зміцнені, так і не зміцнені, встановлювали в піскоструминних камерах, що працюють під тиском повітряної магістралі із тиском  $600 \text{ кН/м}^2$ . Абразивом служив кварцовий пісок з діаметром часточок 0,2 мм. Зносостійкість оцінювали по втраті ваги зразків (табл. 2.3)

*Таблиця 2.3 – результати порівняльних досліджень на ерозійний знос зразків із сталі 30ХГСА, зміцнених ЕЕЛ*

Матеріал покриття	Втрата ваги, г	Час дослідження, год	Кут атаки, градус
Без покриття	51	1	90
Без покриття	38	1	45
ВК6	29	1	90
ВК6	21	1	45
Т15К6	23	1	90
Т15К6	17	1	45
Шликерний метод (90%ВК6 + 10%1М)	27	1	90
Шликерний метод (90%ВК6 + 10%1М)	20	1	45
Метод ЕЕЛ (90%ВК6 + 10%1М)	16	1	90
Метод ЕЕЛ (90%ВК6 + 10%1М)	11	1	45

Таким чином, на основі аналізу проведених досліджень можна зробити висновок, що стійкість проти ерозійного зносу зразків зі сталі 30ХГС з ЕЕЛ покриттям 90%ВК6 + 10%1М у 3,5 рази вище, ніж без покриття в стані термообробки і відповідно в 1,9; 1,5 і 1,7 раз вище, ніж у зразків, зміцнених твердим сплавом ВК6, Т15К6 і шликерним методом. Зносостійкість зразків, розміщених під кутом  $90^\circ$ , вища, ніж у зразків, розміщених під кутом  $45^\circ$  (рис. 2.8).

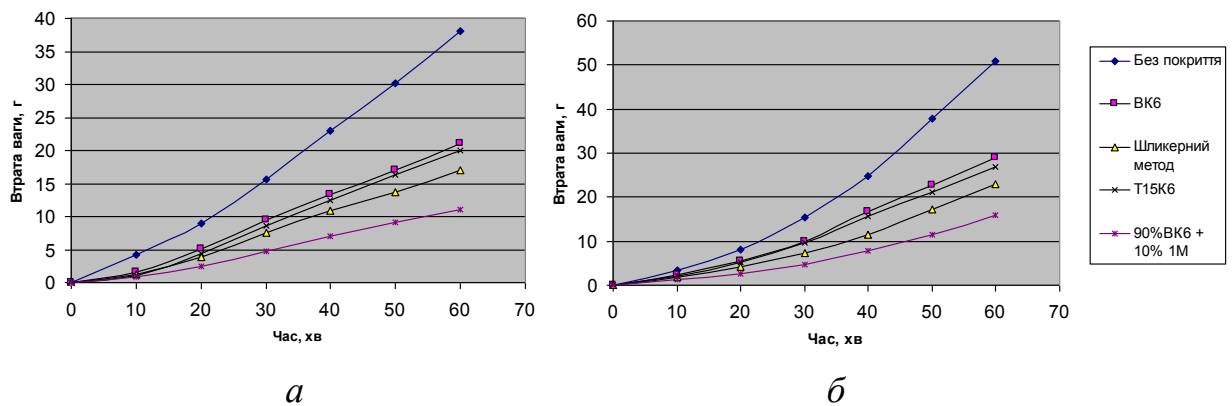


Рисунок 2.8 - Знос зразків зі сталі 30ХГСА зміцнених: 1- без зміцнення; 2 – суміш ВК6; 3- шликерним покриттям сумішею - 90%ВК6 і 10% 1М; 4 - покриття Т15К6; 5 - методом ЕЕЛ ( з електродами складу сумішею 90%ВК6 і 10% 1М), які випробовувалися під кутом атаки 45° (а) і 90° (б)

## Висновки по розділу 2

1. На основі аналізу проведених досліджень встановлено, що стійкість проти ерозійного зносу зразків зі сталі 30ХГС з ЕЕЛ покриттям складу 90%ВК6 + 10%1М була вищою, ніж у зразків зміцнених іншими методами .

2. На основі аналізу проведених досліджень видно, що стійкість проти ерозійного зносу зразків зі сталі 30ХГС з ЕЕЛ покриттям 90%ВК6 + 10%1М у 3,5 рази вище, ніж без покриття в стані термообробки і відповідно в 1,9; 1,5 і 1,7 раз вище, ніж у зразків, зміцнених твердим сплавом ВК6, Т15К6 і шликерним методом.

3. Зносостійкість зразків, розміщених під кутом 90°, вища, ніж у зразків, розміщених під кутом 45°

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В роботі здійснений аналіз конструктивних особливостей робочих коліс насосного та компресорного обладнання. Визначені найбільш характерні ділянки та види зносу, що впливають на довговічність робочих коліс.

2. Досліджені конструктивні та технологічні методи підвищення надійності та довговічності робочих коліс. Виявлено, що найбільш раціональними методом зміцнення та ремонту робочих коліс є метод електроерозійного легування.

3. На основі аналізу проведених досліджень встановлено, що стійкість проти ерозійного зносу зразків зі сталі 30ХГС з ЕЕЛ покриттям складу 90%ВК6 + 10%1М була вищою, ніж у зразків зміцнених іншими методами .

4. На основі аналізу проведених досліджень встановлено, що стійкість проти ерозійного зносу зразків зі сталі 30ХГС з ЕЕЛ покриттям 90%ВК6 + 10%1М у 3,5 рази вище, ніж без покриття в стані термообробки і відповідно в 1,9; 1,5 і 1,7 раз вище, ніж у зразків, зміцнених твердим сплавом ВК6, Т15К6 і шликерним методом.

5. Результати досліджень пройшли апробацію на міжнародній науковій конференції, висвітлені у друкованих працях [41,42] та впроваджені у виробництво.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ястребова Н.А., Кондаков А.И., Лубенец В.Д., Виноградов А.Н. Технология компрессоростроения, М.: машиностроение.
2. Л.А. Иванов, Г.П. Пархоменко. Спеченное покрытие для деталей, работающих в условиях эрозионного износа // Порошковая металлургия. – Киев. – 1974. - № 2. – С. 90-94.
3. М.А. Елизаветин, Э.А. Сатель. Технологические способы повышения долговечности машин. – М.: Машиностроение, 1969.–400 с.
4. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1969. – 327 с.
5. М.М. Хрущов и др. Износостойкость и структура твердых наплавов. – М.: Машиностроение, 1971.
6. В.П.Колгаев, Ю.Н. Дроздов. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высшая школа, 1991. - -319 с.
7. Avaru H.S. Wear resistance. – Handbook of mechanical wear. The University of Michigan. Press, 1961.
8. А.М. Породин, Л.П. Черкасская. Износостойкие наплавочные материалы и методы их наплавки. – М.: НИИ – Маш, 1983. – 48 с.
9. И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский. Триботехника. Физические основы, механика и технические приложения. – Самара: Самар. Гост. Техн. Ун-т., 2000. – 268 с.
10. А.Я. Бойко. Проблемы очистки турбинных масел. Новые методы и техника очистки турбинных масел // Труды пятого научно-технического семинара «Безопасность эксплуатации компрессорного, насосного оборудования и трубопроводной арматуры». – Одесса, 2004. – С. 134-240.
11. В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, М.П. Братушак. Проблеми захисту гнучких турбокомпресорів від фретинг-корозії // Вісник СНАУ. – Випуск 12, 2005. – С. 231-240.
12. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – 540с.

13. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение металлов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1986. – 319с.
14. Черেকেз М.Б., Богорад Л.Я. Хромирование. – Л.: Машиностроение, 1978. – 243с.
15. Богорад Л.Я. О приставаии хрома к стали // Коррозия и борьба с ней. – 1957. – Т.2, № 3. – 258 с.
16. Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1982. – 215 с.
17. Зенкин Н.А., Копылов В.И. Повышение эксплуатационных характеристик композиционных материалов путем оптимизации упрочняющих технологий. – К: Голов. спеціаліз. Ред.. літ. Мовами. нац. меншин України, 2002. – 272 с.
18. Упрочнение деталей пучком лазера / В.С. Коваленко, Л.Ф. Головки, Г.В. Меркулов, А.И. Стрижак. – К.: Техніка, 1981. – 131 с.
19. К.М. Холин, О.Ф. Никитин. Основы гидравлики и объемные гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1989. – 29-64 с.
20. В.Я. Карелин, А.В. Минаев. Насосы и насосные станции, 1986. – 320 с.
21. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В.Д. Зозуля, Е.Л. Шведков, Д.Я. Ровинский, Э.Д. Браун; Отв. ред. И.М. Федорченко. АН УССР. Ин-т проблем материаловедения. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Наукова думка, 1990. – 264 с.
22. Трубопровідний гідротранспорт твердих матеріалів / Б.Ф. Брагін, Г.Н. Делягін, Ф.Д. Маркунтович та ін.; За ред. Б.Ф. Брагіна. – К.: ІСДО, 1993. – т.2. – 327 с.
23. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревутский В.М. – Кишинев: Штинца, 1985. – 196 с.
24. Верхотуров А.Д., Муха И.М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. – К.: Техника, 1982. – 181 с.



25. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Современный уровень развития электроискровой обработки металлов // Электронная обработка материалов. – 1977. - № 3. – С. 12- 16.
26. Лазаренко Н.И. Современный уровень и перспективы развития электроискрового легирования металлических поверхностей // Электронная обработка материалов. – 1965. - № 1. – С. 49-53.
27. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г.В, Самсонов, А.Д. Верхотуров, Г.А. Бовкун, Сычев В.С. / К.: Наукова думка, 1976. – 220 с.
28. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. – М.: Машиностроение, 1976. – 46 с.
29. Верхотуров А.Д., Ляшенко Б.А., Ришин В.В. Некоторые прочностные характеристики слоев, полученных электроискровым легированием // Электронная обработка материалов. – 1973. - №3. – С. 26-28.
30. Рншетников С.М., Вдовин С.Ф.. Применение метода электроискровой металлизации для повышения коррозионной стойкости нелегированной стали // Электронная обработка материалов. – 1977. - № 3. – С. 33-37.
31. Лариков Л.Н. Структурные изменения в приповерхностных слоях стали 45 при электроискровом легировании // Электронная обработка материалов, - 1981. - № 6. – С. 22-24.
32. Андреев В.И. Электроискровое легирование деталей, работающих в условиях термоциклического нагружения // Электронная обработка материалов. – 1973. - №2. – С. 23-25.
33. Ревуцкий В.М. Исследование распределения элементов в электроискровых покрытиях с помощью радиоактивных изотопов // Электронная обработка материалов. – 1981. - № 6. – С. 32-38.
34. Золотых В.Н. Кинетическая устойчивость термодинамических нестабильных атомных смесей, полученных в искровом импульсном разряде // Электронная обработка материалов. – 1977. - № 3. – С. 24-27.

35. Гуревич М.Е. Влияние лазерного излучения на подвижность атомов железа // Физика и химия обработки металлов. – 1977. - № 2 – С. 7-9.

36. Гуревич М.Е. Влияние многократного лазерного воздействия на массоперенос в железе // Металлофизика. – 1978. – Вып. 73. – С. 80-83.

37. Коробейник В.Ф., Рудюк С.И., Коробейник С.В. особенности формирования микротопографии, структуры и субструктуры поверхностного слоя при электроискровом легировании // Электронная обработка материалов. – 1989. - № 1. – С. 15-17.

38. Михайлюк А.И. Влияние электроискрового легирования металлических поверхностей на их износостойкость: Автореф. дис. канд. техн. таук. – М., 1990. – С. 15.

39. Сычев В.С. Исследование электроискрового легирования переходных металлов 4-6-х групп тугоплавкими боридами: Автореф. дис. канд. техн. таук. – М., 1990. – С. 15.

40. Тарельник В.Б. Зміцнення поверхневих шарів інструмента та важко навантажених деталей електроерозійним легуванням з подальшою пластичною деформацією: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Луганськ. – 1994. – 16 с.

41. Практическое применение технологии цементации методом электроискрового легирования для формирования износостойких покрытий/ В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, А. В. Белоус, Е.В. Коноплянченко, О. П. Гапонова, М.Н. Пылыпив// Технології ХХІ сторіччя: Збірник тез за матеріалами 25-ої міжнародної науково-практичної конференції (15-20 вересня 2019 р.). Ч.3. – Суми: СНАУ, 2019.- С.84-94.

42. Аналіз енергоефективних методів інженерії поверхонь робочих коліс роторних машин/ Е.В. Коноплянченко, М. М. Пилипів// Технології ХХІ сторіччя: Збірник тез за матеріалами 25-ої міжнародної науково-практичної конференції (15-20 вересня 2019 р.). Ч.3. – Суми: СНАУ, 2019.- С.94-95.

## ДОДАТКИ