

## ВСТУП

Одним із магістральних напрямків розвитку машинобудування є керування процесом формоутворення поверхневого шару з урахуванням експлуатаційних вимог до виробів. У техніці досить часто до деталей машин пред'являють технічні умови, виконання яких за традиційних технологій неможливе. Так необхідно мати високу міцність об'єктів при мінімальній масі, властивій, як правило, легким сплавам, що мають менші, ніж у сталі, характеристики міцності. Такі ж взаємовиключні вимоги мають місце при використанні жароміцних матеріалів. Відомі дослідження показують, що при експлуатації виробів механічні характеристики, у тому числі втомна міцність матеріалів, визначені від стану та властивостей поверхневого шару, тому обґрунтований вибір та проектування технологічних процесів отримання виробів з властивостями, що найбільш повно відповідають умовам експлуатації виробів. Проведені в останні десятиліття дослідження показали, що розвиток проблеми йде в таких основних напрямках:

- з модифікацією властивостей без видалення припуску з цілеспрямованим комбінованим впливом на поверхневий шар. Це, перш за все, теплові, механічні, хімічні процеси, електромагнітні дії, поєднання яких у єдиній комбінованій технології дозволяє надати деталям підвищених експлуатаційних характеристик. У процесі модифікації можуть формуватися наноплівки з товщиною, що не впливає зміну розмірів виробу;
- з видаленням частини поверхневого шару виробу до отримання матеріалу, що має необхідні експлуатаційні властивості;
- з нарощуванням шарів із матеріалів з особливими властивостями з монолітною структурою, де експлуатаційні властивості забезпечуються шляхом перенесення на деталь (у тому числі з інших видів матеріалів) необхідних характеристик (зносостійкість, жаростійкість та ін.) до виробу через параметри покриття, що наноситься.

Типовим представником такої технології є електроерозійне легування, яке останніми роками стало широко використовуватися у вигляді технології відновлення геометрії деталей з нарощуванням шарів товщиною понад 1 мм. Це

дає підстави стверджувати, що такий процес стає частиною технології прототипування. Тут досягається принципово новий результат, що усуває основний недолік процесу прототипування:

- нестабільність характеристик міцності, т.к. при нанесенні покриття властивості базової деталі не порушуються, а міцність шару забезпечується застосуванням адаптивних комбінованих процесів, як правило, з накладенням електричного поля;

- з нанесенням шарів, що включають гранули струмопровідних та діелектричних матеріалів (наприклад, кераміки, абразиву та ін.).

Це розширює можливості розробників зі створення сучасної техніки, що також актуально, особливо для провідних галузей вітчизняного машинобудування: виробів авіаційної, космічної техніки, ремонту транспортних засобів та ін. експлуатаційні вимоги до виробів, особливо у наукомістких галузях машинобудування. При цьому слід враховувати обмеження, одним із яких є вимога з боку замовника забезпечити мінімальну собівартість (включаючи трудомісткість виготовлення) виробів. Цей показник формується комплексно, шляхом оптимізації обраних поєднань методів обробки, обґрунтованого вибору матеріалів основи та покриття або поверхневої обробки, способу одержання поверхневого шару з урахуванням меж заданих експлуатаційних вимог до виробу, витрат праці та матеріалів на об'єкти виробництва.

# 1. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ЕЛЕКТРОІСКРОВОЇ ОБРОБКИ І ЇЇ ВПЛИВ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ

## 1.1. Фізичні процеси електроіскрової обробки.

Електроіскрове легування металевих поверхонь засноване на явищі електричної ерозії та перенесення матеріалу анода (інструменту) на катод (деталь) при перебігу імпульсних розрядів у газовому середовищі. При електроіскровому легуванні еродований матеріал електрода - анода переноситься на електрод-катод, а матеріал катода - на анод, причому, переважному руйнуванню та переносу піддається матеріал анода. Важливим елементом електроіскрової обробки матеріалів у газовому середовищі є вміння керувати процесом обробки та прогнозувати властивості покриття: товщину, мікро- та макроструктуру, фізико-механічні властивості (зносостійкість, корозійну стійкість, опір втоми тощо) [3-7]. При зближенні електродів напруженість електричного поля між ними зростає. При досягненні певної величини напруженості поля відбувається пробій проміжку між електродами, у результаті з'являється канал наскрізної провідності. Через канал, що виникає, потік електронів спрямовується до анода, а потік іонів рухається до катода (рис.1.1) [5].

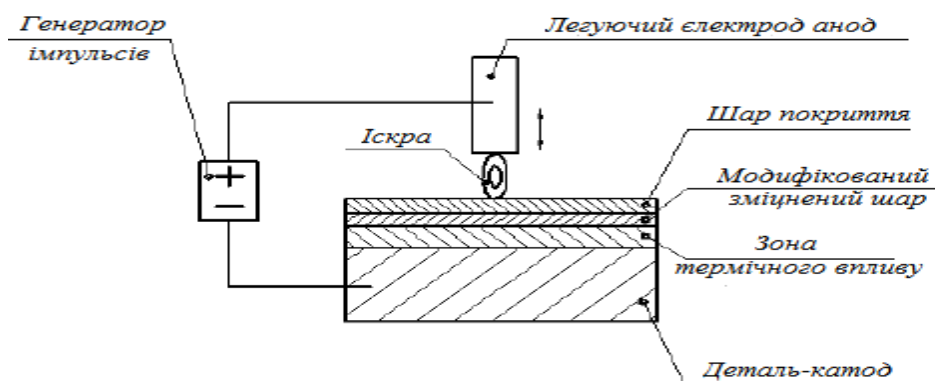
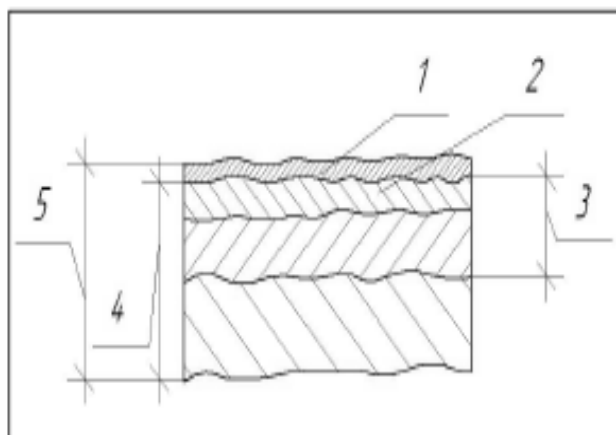


Рис. 1.1. Принципова схема процесу ЕІО.

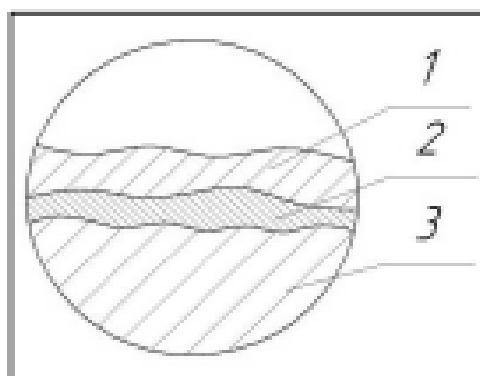
В процесі електроіскрового легування поверхня електрода піддається локальній дії високих тисків і температур: тиск ударної хвилі становить (2,7) Па, температура нагріву поверхневих мікрооб'ємів досягає (5,7) К, тобто значно перевищує температуру кипіння електродних матеріалів. Автори [8, 9] ділять його

на наступні зони, представлені на рис. 1.2.



**Рис. 1.2.** Поверхневий шар, отриманий після ЕІЛ: 1 - зона відкладення матеріалу електрода (анода); 2 - «білий» шар, утворений з розплавленого матеріалу заготовки; 3 - зона термічного впливу; 4 - зона пластичної деформації; 5 - змінений поверхневий шар.

Багаторазова дія іскрових розрядів призводить до припинення зростання товщини шару, що легується. Основними причинами, що викликають зупинку зростання товщини є: - накопичення внутрішніх напруг, у тому числі за рахунок утворення в покритті нових фаз з різним коефіцієнтом термічного розширення; - збільшення термовтоми покриття як результат багаторазових циклів нагрівання та охолодження його мікрооб'ємів; - утворення ультрадисперсної структури (рис. 1.3).



**Рис. 1.3.** Змінений поверхневий шар катода, отриманий після ЕІЛ.

1 - «білий» шар; 2 - перехідний шар; 3 - незмінений матеріал заготовки.

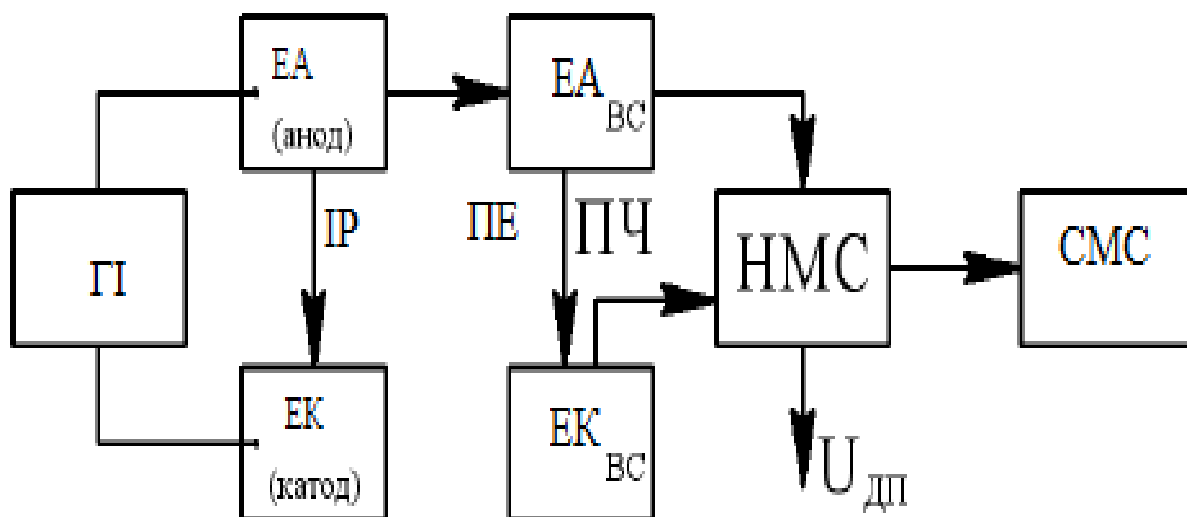
При одиничному розряді на поверхні катода утворюється лунка з піднятими над поверхнею краями в результаті викиду електронів при впливі на катод імпульсів електричного струму [17,19]. Параметри лунок визначають від ерозійної стійкості матеріалів електродів та енергії електричного імпульсу. При багаторазовій дії імпульсів в одну точку на катоді утворюється замість шару матеріалу сильно збільшена в розмірах лунка, що призводить до необхідності постійного переміщення легуючого електрода (анода) вздовж оброблюваної поверхні.

При зміщенні точки застосування наступного імпульсу на величину меншу, ніж діаметр лунки, розряд протікатиме через найбільш виступаючу частину поверхні, тобто край лунки, утвореної попереднім розрядом. При цьому частина металу з краю лунки переміститься до центру. Таким чином, на катоді одночасно з утворенням легованого шару відбуватиметься переміщення розплавлених та розм'якшених зон матеріалу електродів. Якщо контактуюча площа анода більше площі лунки, що утворюється, то найбільш якісний шар виходить при зміщенні електрода на  $1/4$  діаметра лунки. Вивчення одиничних слідів розрядів у середовищі повітря, що залишаються окремими каналами іскри на поверхні монокристалів, показує, що в одну напівхвилю струму розряд залишає багато поодиноких слідів на поверхні металу. При цьому спостерігається один і той же характер зміни поверхні анода - оплавлення та пластична деформація оплавленої та прилеглої до неї зони. Оплавлена одинична лунка на аноді має форму правильного кола і практично не залежить від кристалографічного орієнтування зерен металу. Зона пластичної деформації поширюється за межі ділянки, ураженої розрядом, і виглядає так, ніби деформація проводилася зосередженим механічним навантаженням. Для всіх досліджених металів за всіх режимів обробки на катоді виходять різко обмежені лунки, що є результатом механічного руйнування поверхні. Форма лунок залежить від кристалографічної орієнтації досліджуваної грані зерна металу. Різний характер лунок на аноді та катоді пояснюється тим, що на аноді область, уражена окремим каналом іскри, значно більша, ніж на катоді. Тому на аноді імпульсний тиск спадає значно повільніше за часом, ніж на катоді, і плавлення переважає ефект «відколу».

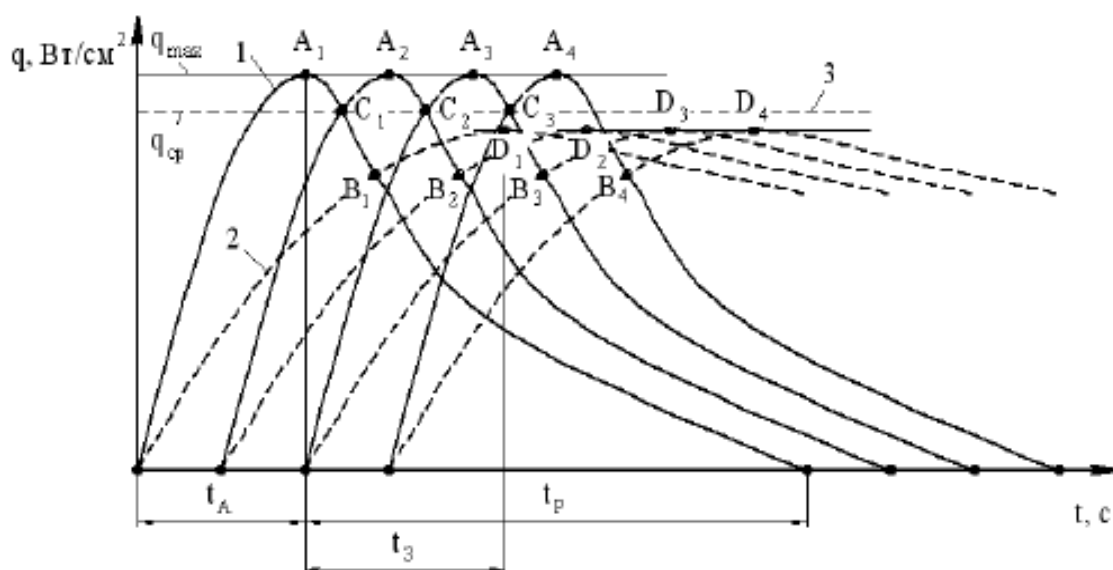
Для отримання якісних товстошарових покриттів необхідно забезпечити ерозію матеріалу анода переважно в крапельно - рідкій фазі [17,20] (правомірність цього твердження може бути поставлена під сумнів), і по можливості зменшити вміст у продуктах ерозії парогазової фази, яка сприяє розпиленню крапельно - рідкої фази міжелектродний простір. Дія іскрового розряду на поверхню сталевих деталей призводить до суттєвої зміни субструктури їхньої поверхні та напруженого стану в зоні дії іскрового розряду [14-20]. При дії одиничного іскрового розряду на поверхні металу в області ерозійного кратера виникають три зони [19]: зона плавлення матеріалу (глибина  $\sim 100$  мкм), в якій фіксуються спотворення кристалічних ґрат, а також наявність дрібних зерен; зона найбільшого зміцнення з локальним підвищенням твердості більш ніж на 400 МПа (глибина  $\sim 120\div 150$  мкм), в якій спостерігаються ділянки з однорідним розподілом дислокацій високої щільності ( $1/$ ; зона, в якій твердість підвищується на величину від 50 до 400 МПа (глибина  $\sim 150\div 200$  мкм).

Вплив електричної іскри на анод в основному складається з плавлення і випаровування металу, а на катод - як мікровибух, супроводжуваний механічними ушкодженнями у вигляді лунки з піднятими над поверхнею краями. Так як всі метали по ерозійній стійкості розташовуються в певний ряд [19,27], (починаючи з олова і закінчуючи вольфрамом), то модель процесу переносу матеріалу з анода на катод для кожного металу буде різна.

Коли на алюміній наносяться матеріали з невеликою ерозійною стійкістю (олово, цинк), то кількість металу, яка викидається одиничним імпульсом з анода велике, а з катода - мізерно настільки, що їм можна знехтувати. Якщо електроерозійна стійкість матеріалу катода вище, ніж у матеріалу анода, то на поверхні утворюється покриття, а якщо нижче, то на поверхні катода утворюються лунки і покриття не утворюється, так як кількість матеріалу, осідає на катоді менше порції матеріалу, викинутої з поверхні катода.



**Рис. 1.4.** Структурна схема термодинамічних процесів: ГІ – генератор імпульсів; ЕА – анод у вихідному стані; ЕК – катод у вихідному стані; ІР – іскровий розряд; ПЕ – потік електронів; ПЧ – потік частинок; ЕАЗС – анод в збудженому стані; ЕКЗС – катод в збудженому стані; НМС – нестійка модифікована структура; СМС-стійка модифікована структура.

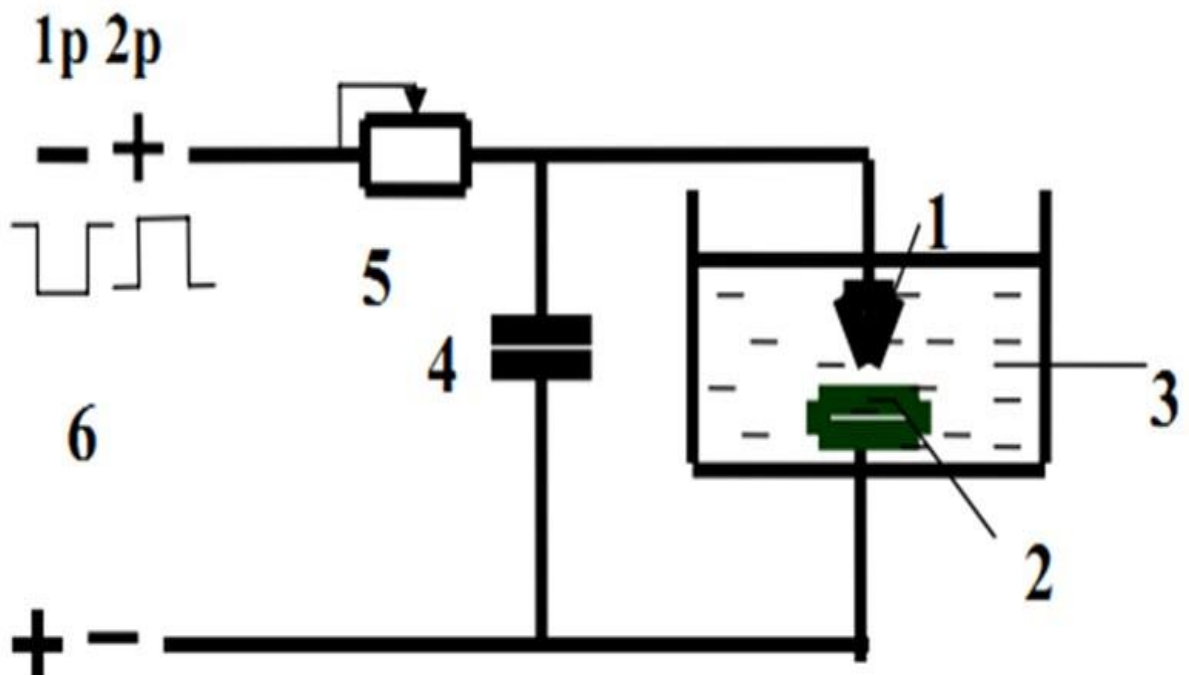


**Рис.1.5.** Формування енергетичних активаційних і дисипативних потоків при електроіскровій обробці: 1 – залежність щільності потужності активаційного процесу; 2 – залежність щільності потужності дисипативного процесу; 3 – щільність потужності при стаціонарному процесі.

В результаті електроіскрового легування змінюються розміри, рельєф (шорсткість), а також фізичні, хімічні і механічні властивості поверхневого шару оброблюваної деталі, що дозволяє отримувати робочі поверхні з потрібними експлуатаційними характеристиками. Для зміцнення і підвищення зносостійкості поверхні деталей бажано отримувати їх з мінімальною шорсткістю ( $Ra \approx 10\text{мкм}$ ) і достатньої товщини ( $t \sim 0,5\text{ мм}$ ).

## 1.2. Механізм утворення поверхневого шару електроіскрової обробки.

При електроіскровому легуванні під впливом імпульсних розрядів на оброблюваній поверхні утворюється змінений поверхневий шар. Якісні і кількісні характеристики отриманого шару визначені показниками: природи і матеріалу електрода, характеристик імпульсного розряду, тривалості обробки, газового середовища міжелектродного проміжку і т.д.



**Рис. 1. 6.** Схема електроерозійної обробки матеріалів: 1 - електрод-інструмент, 2 - оброблювана деталь, 3 - середовище, в якому проводиться розряд, 4 - конденсатор, 5 - реостат, 6 - джерело живлення, 1р - режим електроіскрової обробки, 2р - режим електроімпульсної обробки.



Схема живиться імпульсною напругою різної полярності, що відповідає електроіскровому режиму (1р) і електроімпульсному режиму (2р). Напруга живлення заряджає конденсатор (4), паралельно якому включений розрядний проміжок (1) і оброблювану деталлю (2), які поміщені в рідину з низькою діелектричною проникністю. Коли напруга на конденсаторі перевищить потенціал запалення розряду, відбувається пробій рідини. Рідина нагрівається до температури кипіння і утворюється газовий пухир з пари рідини. Далі електричний розряд розвивається в газовому середовищі, що приводить до інтенсивного локального розігрівання деталі, приповерхневі шари матеріалу плавляться і продукти розплаву у вигляді кульок застигають в проточній рідині і виносяться із зони обробки.

Механізм утворення поверхневого шару відбувається наступним чином. При одиничному розряді на поверхні катода утворюється лунка, з піднятими над поверхнею краями в результаті викиду електронів при впливі на катод імпульсів електричного струму [3,17]. Розміри лунок залежать від ерозійної стійкості матеріалів електродів і енергії електричного імпульсу. При багаторазовій дії імпульсів в одну точку на катоді утворюється замість шару перенесеного матеріалу, сильно збільшена в розмірах лунка, що призводить до необхідності постійного переміщення легувального електрода (анода) уздовж оброблюваної поверхні. Якщо швидкість переміщення електрода така, що до моменту наступного імпульсу електрод встигне зміститися на діаметр лунки, то поверхня катода після однократного проходу електрода буде мати зубчастий профіль, в якому зубці утворені краями сусідніх лунок. При зміщенні точки прикладання подальшого імпульсу на величину меншу, ніж діаметр лунки, розряд буде протікати через найбільш виступаючу частину поверхні, т. е. край лунки, утвореної попереднім розрядом. При цьому частина металу з краю лунки переміститься до її центру. Таким чином, на катоді одночасно з утворенням легованого шару буде відбуватися переміщення розплавлених і розм'якшених зон матеріалу електродів. Встановлено [30], що якщо контактуюча площа анода більше площі утвореної лунки, то найбільш якісний шар виходить при зміщенні

електрода на  $1/4$  діаметра лунки. Вивчення одиничних слідів розрядів в середовищі повітря [4,19], що залишаються окремими каналами іскри на поверхні монокристалів, показує, що в одну півхвилю струму розряд залишає багато одиничних слідів на поверхні металу. При цьому спостерігається один і той же характер зміни поверхні анода - оплавлення і пластична деформація оплавленої і пов'язаною з нею зони. Оплавлена одинична лунка на аноді має форму правильного кола і практично не залежить від кристаллографічного орієнтування зерен металу. Зона пластичної деформації поширюється за межі ділянки, ураженої розрядом, і виглядає так, як якщо б деформація проводилася зосередженої механічним навантаженням.

Для всіх досліджених металів [4,19] при всіх режимах обробки на катоді виходять різко обмежені лунки, які є результатом механічного руйнування поверхні. Форма лунок залежить від кристаллографічної орієнтації досліджуваної межі зерна металу. Різний характер лунок на анод і катод пояснюється тим, що на аноді область, уражена окремим каналом іскри, значно більше, ніж на катоді. Тому на аноді імпульсний тиск спадає значно повільніше за часом, ніж на катоді, і плавлення преважає над ефектом «відколу».

Для отримання якісних товстошарових покриттів необхідно забезпечити ерозію матеріалу анода переважно в крапельно - рідкої фазі [7,9]. Дія іскрового розряду на поверхню сталевих деталей призводить до істотної зміни субструктури їх поверхні і напруженого стану в зоні дії іскрового розряду. При дії одиничного іскрового розряду на поверхні металу в області ерозійного кратера виникають три зони [3,5,14,19]: зона плавлення матеріалу (глибина  $\sim 100$  мкм), в якій фіксуються спотворення кристалічної решітки, а також наявність дрібних зерен; зона найбільшого зміцнення з локальним підвищенням твердості більш ніж на 400 МПа (глибина  $\sim 120$ ч $150$  мкм), в якій спостерігаються ділянки з майже однорідним розподілом дислокацій високої щільності; зона, в якій твердість підвищується на величину від 50 до 400 МПа (глибина  $\sim 150\dots 200$  мкм).

Тут же буде розглянута проста схема видалення металу з області обробки за допомогою електричної ерозії.

Таблиця 1.1.Залежність величини ерозії сталевого електроду (анода) від енергії і тривалості одиночного імпульсу.

Характеристика імпульсу			Розміри лунки	
Енергія, Дж	Тривалість, мкс	Глибина, мм	Діаметр, мм	Об'єм, мЗ
0,001	9	0,015	0,1	0,000078
0,1	40	0,025	0,75	0,0074
1,0	60	0,042	1,65	0,06
2,0	1500	0,050	2,00	0,10

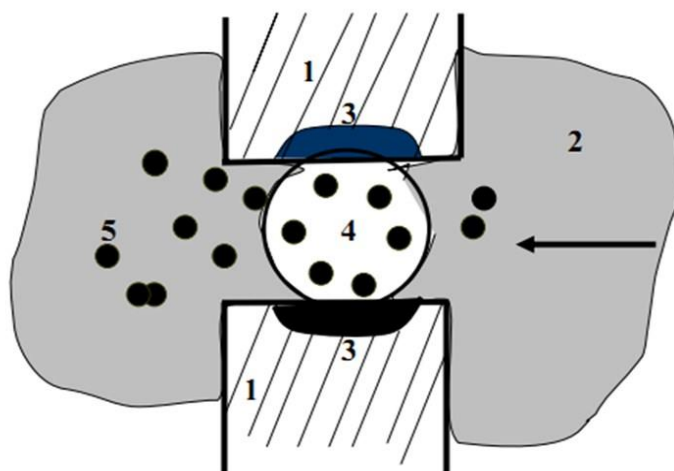


Рис. 1.7. Режим електроерозійної обробки: 1 - електроди, 2 - рідина, 3 - лунки, 4 - газовий пухир, 5 - продукти ерозії.

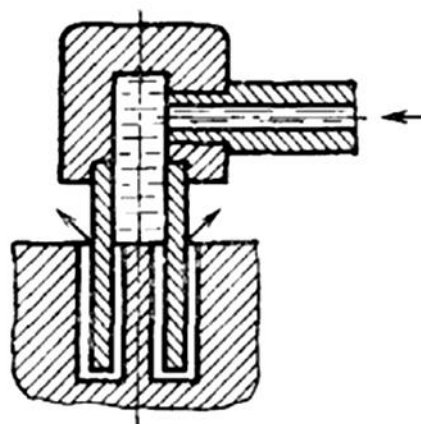


Рис.1.8. Схема підведення рідини в міжелектродний проміжок через порожнистий електрод при прошивці отвору.

Тиск рідини залежить від глибини отвору і величини міжелектродного проміжку. Вібрації особливо необхідні при електроіскрової обробці глибоких отворів. Більшість електроерозійних верстатів забезпечена спеціальною вібраційною головкою.

### **1.3. Режими процесу електроіскрового легування.**

Для здійснення електроіскрового легування застосовуються схеми з накопиченням енергії в конденсаторах і розрядом за рахунок контакту електрода з поверхнею деталі.

Всі процеси, що обумовлюють електроіскрову обробку, протікають в режимі короткого замикання в газовому міжелектродному проміжку товщиною від 1 до 15 мкм, причому захоплюють лише поверхневі шари електрода (анода) і деталі (катода). При іскровому розряді в газовому проміжку виникає зустрічний рух електронів і позитивних іонів, що створює електричний струм, величина якого визначається різницею позитивних і негативних зарядів. Існує два механізми організації розряду накопичувальних конденсаторів [3,5,14,18]:

- початок розряду накопичувальних конденсаторів відбувається в режимі короткого замикання;
- розряд відбувається при відході електрода від поверхні деталі.

Модель процесу електроіскрової обробки з контактним початком роботи в газовому середовищі полягає в тому, що вібруючий електрод наближається до поверхні деталі, мікрорельєф якої складається з великої кількості нерівностей. При зіткненні вершин нерівностей деталі і електрода відбувається розряд конденсаторів з утворенням плазмового каналу наскрізної провідності, через який здійснюється імпульсний розряд енергії накопичувального конденсатора.

Після розряду відбувається відхід електрода під впливом газодинамічних сил, що виникають від вибухового оплавлення містків зв'язку.

Після відходу електрода відбувається заряд конденсатора і процес повторюється.

Руйнування і перенесення матеріалу електрода на поверхню деталі розділяється на дві стадії:

- мостикова стадія - наплавка в режимі короткого замикання;
- робота з плазмовим проміжком.

У разі, коли тривалість імпульсу струму більше, ніж час розігріву матеріалу до оплавлення, можлива електроіскрова наплавка в режимі короткого замикання. При цьому режимі характерна груба текстура поверхні з великими параметрами шорсткості, тому що перенесення розплавленого матеріалу відбувається порціями. Порції виходять в результаті утворення розплавлених містків між електродом і деталлю при відході електрода. Так як швидкість охолодження частини містка, що прилягає до деталі, вище, ніж частини, прилеглої до електрода, то при відході електрода більша частина містка залишається на деталі, утворюючи покриття.

Режим роботи з плазмовим проміжком відрізняється тим, що коротке замикання між електродами не утворюється, так як електрод під впливом газодинамічних сил, що виникають від вибухового оплавлення містків зв'язку, відкидається від деталі. В результаті цього утворюється зазор, наповнений плазмою. В цьому режимі основна маса еродованого матеріалу виділяється в рідкій і рідко-паровій фазах. При утворенні плазми через її низький опір відбувається розвиток іскрового розряду, що веде до росту ерозії електрода і переносу матеріалу на поверхню деталі.

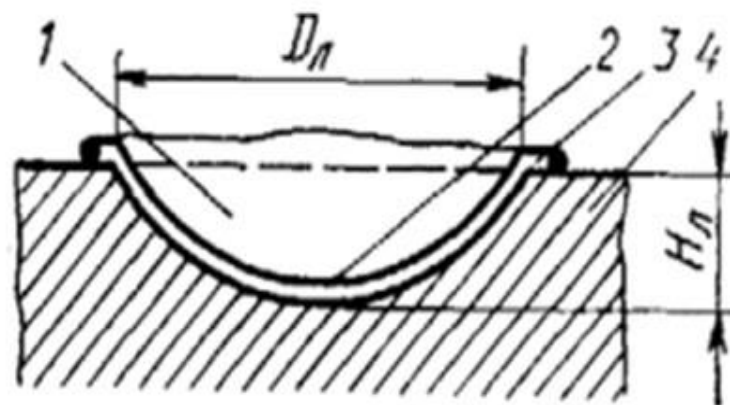
Відмінність режиму мостикової стадії від режиму з плазмовим проміжком полягає в тому, що в першому випадку кількість електрики, що пропускається в режимі короткого замикання, становить не більше 10%, а в другому випадку - близько 100% від загального заряду конденсаторів.

Вплив електричної іскри на анод в основному складається з плавлення і випаровування металу, а на катод - як мікробибух, супроводжуваний механічними ушкодженнями у вигляді лунки з піднятими над поверхнею краями. Так як всі метали по ерозійної стійкості розташовуються в певний ряд [14,20], (починаючи з олова і закінчуючи вольфрамом), то модель процесу переносу матеріалу з анода на катод для кожного металу буде різною.

Коли на алюміній наносяться матеріали з невеликою ерозійної стійкістю

(олово, цинк), то кількість металу, яка викидається одиничним імпульсом з анода велике, а з катода - мізерно настільки, що їм можна знехтувати. Якщо електроерозійна стійкість матеріалу катода вище, ніж у матеріалу анода, то на поверхні утворюється покриття, а якщо нижче, то на поверхні катода утворюються лунки і покриття не утворюється, так як кількість матеріалу, осідає на катоді менше порції матеріалу, викинутої з поверхні катода.

В результаті електроіскрового легування змінюються розміри, рельєф (шорсткість), а також фізичні, хімічні і механічні властивості поверхневого шару оброблюваної деталі, що дозволяє отримувати робочі поверхні з потрібними експлуатаційними характеристиками. Для зміцнення і підвищення зносостійкості поверхні деталей бажано отримувати їх з мінімальною шорсткістю ( $Ra \approx 10\mu\text{м}$ ) і достатньої товщини ( $t \sim 0,5\text{ мм}$ ). Нові технології електроіскрового легування умовно можна поділити на чотири групи: 1. електроіскрове легування у гетерогенних середовищах. 2. електроіскрове легування електродами з обмазуванням. 3. електроіскрове легування порошковими електродами. 4. термореакційне електроіскрове легування. Встановлено підвищену концентрацію наночастинок у поверхневому шарі покриття, отриманого за допомогою електроіскрового легування, порівняно з межею розділу підкладка-покриття.



**Рис. 1.9.** Лунка, одержана в результаті дії одиничного імпульсу: 1 - простір, що залишився після виплавки металу; 2 - білий шар; 3 - вал навкруги лунки; 4 - оброблювана заготовка; БЛ, НЛ - діаметр і глибина лунки.

#### 1.4. Електроди для електроіскрового легування.

Перший напрямок збільшення зносостійкості - отримання твердого, міцного і щодо товстого покриття – можна реалізувати шляхом зміни фізико-хімічних характеристик електрода-анода: зменшенням його щільності і зниженням теплопровідності. Цього можна досягти двома шляхами: шляхом застосування електродів з регульованою пористістю і застосуванням електродів з гетерофазної структурою. [5,18,19].

Пористі електроди можна виготовляти тільки такими способами, які забезпечують отримання в електродах заданої пористості. До таких способів з широко відомих і вживаних в даний час відносяться порошкова металургія [20] і лиття під тиском [19].

З цього методу можна отримувати матеріали з аморфних сплавів з ультра дисперсною структурою, які мають унікально високими властивостями: механічними, зносостійкими, антифрикційними і т.д.. Застосування, наприклад, в якості анодів стандартних порошкових сплавів типу САП1 САП5, які містять оксиди алюмінію з розмірами зерна  $\leq 100$  мкм і менше, може дати дуже цікаві результати. Литтям під тиском теж можна отримувати електроди із заданою пористістю. Перевагою способу є висока продуктивність і можливість отримувати електроди потрібного діаметру (1... 10мм) без подальшої механічної обробки. Недоліком можна вважати можливість отримувати електроди тільки з кольорових сплавів [17]. При цьому виявлено ще одне унікальне властивість наноструктур: при збільшенні міцності одночасно зростає пластичність. Так в наноструктурних алюмінієвих сплавах була отримана міцність = 800МПа, що в 2 рази перевищує міцність самого міцного литого алюмінієвого сплаву складу Al-Zn [21]. При високошвидкісній деформації алюмінієвого сплаву з наноструктурою отримано рекордне значення сверхпластичності: відносне подовження досягло величини  $\sim 1620\%$ , при відносному подовженні звичайного сплаву 20-30%.

Звідси можна зробити припущення, що якщо в електродах для електроіскрового легування алюмінієвих сплавів буде всього лише кілька відсотків частинок з нанометровій розмірністю, то це може привести до значного

поліпшення властивостей покриття.

Останнім часом збільшилася кількість досліджень, присвячених наноструктуруванню поверхні металів і сплавів електроіскровою обробкою [11,33].

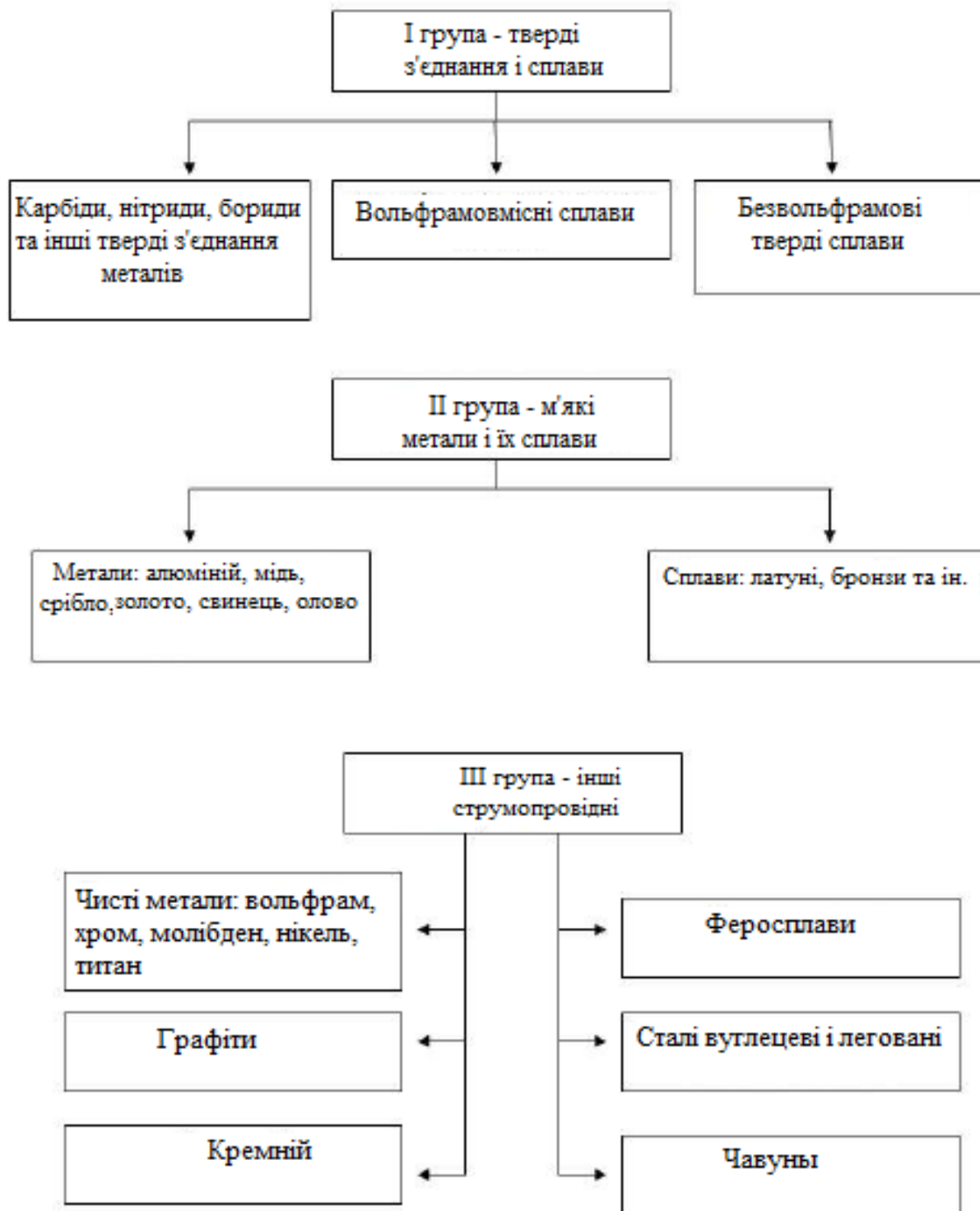


Рис. 1.10. Електродні матеріали для електроіскрового легування.



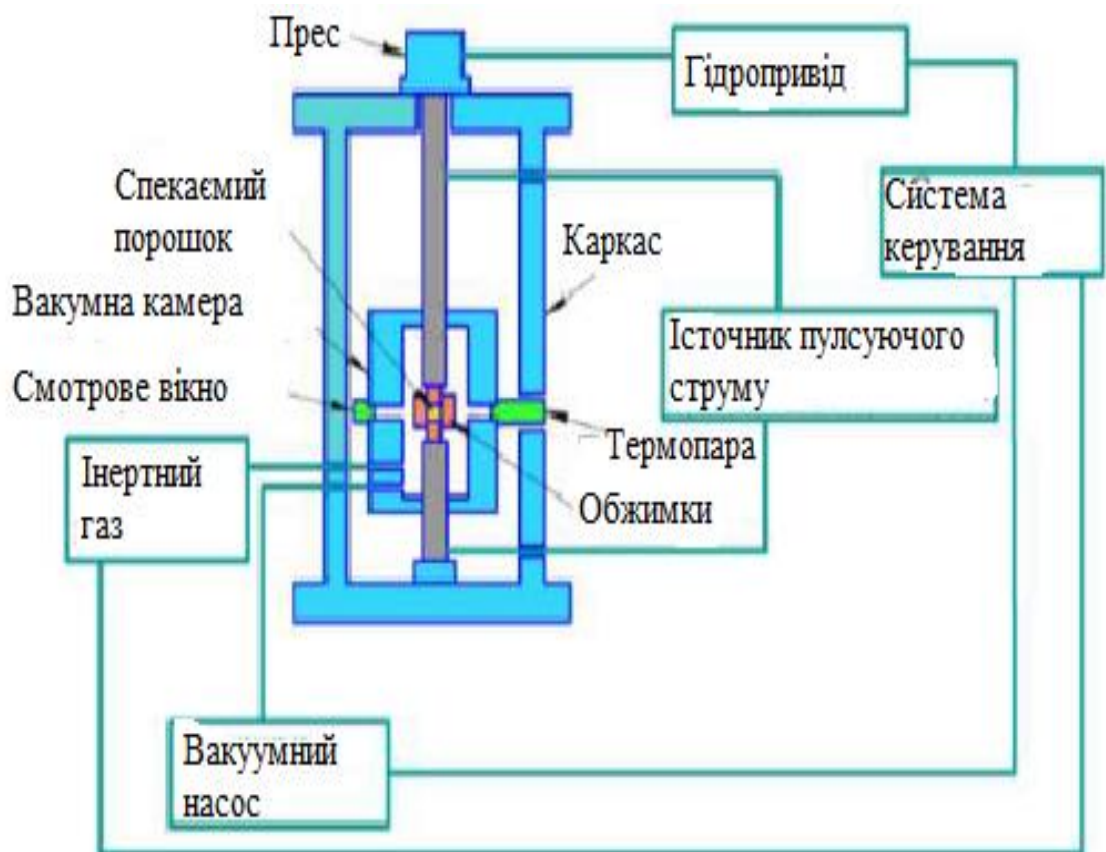


Рис.1.11. Принципова схема обладнання іскрового плазмового спікання [17].

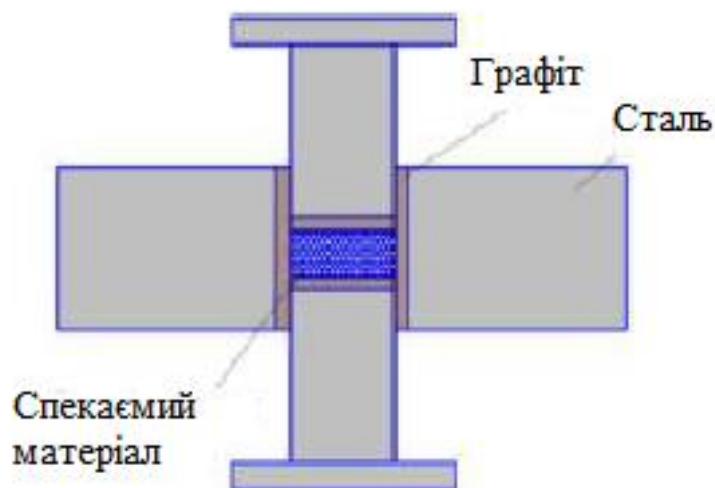


Рис.1.12. Робоча зона обладнання.

Дослідження формування структури і рельєфу поверхні металів під дією електроіскрового легування на мідній і нікелевої фользі показало [17], що в наслідок перекристалізації поверхня фольги наноструктурується і на поверхні

фольги утворюється структура з дрібних кристалітів розміром порядку  $\sim 100$  нм, що відповідно призводить до значного поліпшення властивостей. В роботі [28] досліджувалося формування наноструктурних електроіскрових покриттів на сталі 20Х електродами зі сталі марок 85, 65Г, Св08, при цьому отримано підвищення зносостійкості в 1,8-2,4 рази.

Широкі дослідження [27,28] щодо впливу нанокристалічних порошків на процес формування структури і властивості покриттів електродами різного хімічного складу показали, що введення до складу електродного матеріалу наночастинок призводить до збільшення мікротвердості і зносостійкості покриттів, при цьому підвищена концентрація нанокристалічних частинок спостерігається саме в поверхневому шарі покриття.

Реалізувати унікальні властивості наноструктурних матеріалів можна шляхом виробництва нанопорошків з подальшим компактуванням в об'ємні вироби різними способами. Нанопорошки мають величезну питому поверхню, що й надає їм унікальних властивостей. Так, наприклад, при діаметрі частинок 100 нм площа поверхні досягає 30 м<sup>2</sup>/г, у зв'язку з чим підвищуються практично всі механічні та фізичні властивості виробів з наноструктурованим будовою. Твердість у нанокристалічних матеріалів у 2-7 разів вища, ніж у матеріалів з макрокристалічною об'ємною будовою, а модуль пружності на 30% нижче.

У металообробці з п'яти категорій наноматеріалів найбільше застосування отримала категорія нанокомпозити, причому наноматеріали використовуються переважно в покриттях, як на різальних інструментах, так і на поверхнях деталей, що труться.

Таблиця 1.2 Основні категорії наноматеріалів

№ п/п	Тип наноматеріалу	Визначення
1	Тверді наночастинки	Наддрібні тверді частинки нанорозмірні, включаючи нанокристали та нанопорошки
2	Нанотрубки та інші порожнисті наночастинки	Порожнисті частинки нанорозміру, включаючи нанотрубки, а також інші види порожнистих частинок (нанокапсули, наноріжки та ін.)
3.	Нанорозмірні плівки	Покриття, товщина яких знаходиться в нанорозмірному діапазоні і є нанокристалічні або виявляють квантові властивості.
4.	Наноструктурні монолітні матеріали	Об'ємні тверді тіла, внутрішня структура яких є нанорозмірною
5.	Наноккомпозити	Суміш із двох або більше різнорідних компонентів, щонайменше один з яких має нанорозміри

Для значного підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів шляхом отримання на поверхні покриттів, необхідно також вводити до складу покриттів наночастинки в тому чи іншому вигляді. При застосуванні цієї мети електроіскрового легування частки можуть вводитися шляхом використання електродів з добавками нанопорошків чи нановолокон. Для цього необхідно вивчити властивості наноматеріалів (у вигляді порошків, волокон, кластерів тощо) та підібрати або виготовити відповідні нанопорошки для отримання відповідних електродів. З метою підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів, можна скористатися іншою властивістю цих матеріалів - підшихтуванням їх до звичайних порошкових матеріалів при виготовленні різних виробів методом порошкової металургії. Дослідженнями [18] встановлено, що при невеликих добавках нанопорошків у кількості 1-5% за обсягом властивості порошкових сталей значно змінюються. Так добавка 6% нанопорошку в шихту сталі X12H2 дозволила отримати збільшення твердості та ударної в'язкості майже в 1,5 раза.



**Рис 1.13.** Індуктор високочастотної установки ВЧ-10У з тиглем для плавки алюмінієвих сплавів.

### **1.5. Установки для нанесення покриттів методом електроіскрового легування.**

Перші промислові установки для ЕІЛ розробили і виготовили ще в СРСР (ЦНДЛ-електро) під керівництвом Б.Р. Лазаренко і Н.І. Лазаренко.

Починаючи з 60-х років, випускалися вітчизняні установки типу ЕФД, які призначені як для «чистового», так і для «грубого» електроіскрового легування. В даний час використовуються модернізовані установки призначені для електроіскрового легування як вітчизняних так і зарубіжних фірм. До основних частин таких установок відносяться: блок живлення і ручний вібратор пістолетного типу.

Як джерела електричних імпульсів в даних установках є генератори типу РС, які були запропоновані Б.Р. Лазаренко і Н.І. Лазаренко. Робота установок заснована на тому, що джерело постійного струму через струмообмежуючі резистор заряджає накопичувальний конденсатор. Електрична енергія накопичена конденсатором в момент пробую міжелектродного проміжку швидко

звільняється. За допомогою вібруючого або обертового електрода відбувається здійснення комутації електричного кола.

Автори [9] описують, що для «чистового» ЕІЛ застосовуються генератори високих частот у яких комутуючі елементи для зарядного Кз і розрядного Кр ланцюгів мають управління, яке не залежить від міжелектродного проміжку, яке виробляється автономним блоком управління, які розділені в часі по ланцюгах Кз і Кр.



**Рис.1.14.** Установка для електроіскрового легування ALIER31.

Таблиця 1.3. Параметри покриття, одержуваного на установці ALIER-31

Режим	Товщина покриття, мм	Шорсткість покриття Rz, мкм	Продуктивність см <sup>2</sup> / хв
1	0,01	3	6,0
2	0,03	10	6,0
3	0,05	20	6,0
4	0,07	30	6,0
5	0,09	40	6,0
6	0,12	50	6,0
7	0,2	100	6,0

Таблиця 1.4. Параметри технологічних імпульсів генератора установки ALIER-31

Режим	Тривалість імпульсу, мкс	Амплітуда імпульсу струму, А	Енергія імпульсу, Дж
1	16	125	0,036
2	31	125	0,07
3	62	175	0,20
4	125	175	0,39
5	250	175	0,79
6	500	175	1,58
7	1000	175	3,15

В таблиці 1.4 наведені приклади ручних і механізованих установок для ЕІЛ.



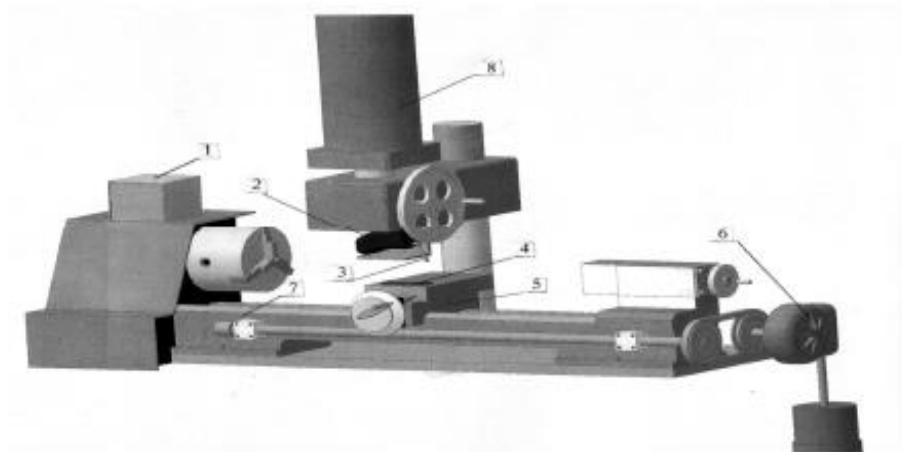
**Таблиця 1.5. Приклади ручних і механізованих установок для ЕІЛ.**

Молдова	РУЕІЛ-2006 (ручна установка електроіскрового легування). До складу установки входить два електроди віброуючий і обертовий.
	МЕІЛ-14 (механізована установка електроіскрового легування) з ЧПУ. Установка дозволяє виконувати ЕІЛ але заданою програмою.
	Аlier-31, Аlier-52, Аlier-53, Аlier-54 і інші.
США	Electroarc, Mold Doctor
Німеччина	Tucadur 2000, Eroleg
Франція	SNPM1
Японія	SparkDepo mod.500, 300, 200; MicroDepo mod.100, 140; Depozitron
Китай	D9105A, D9110A, D9130A
Угорщина	Duromatic
Швейцарія	Carbidor
та інші установки	

Склад одержуваних покриттів, а також їх властивості повинні значною мірою залежати від умов взаємодії електрода, що обробляє, з поверхнею деталі, оскільки подібні умови визначають контрольованість параметрів обробки. Однак при ручному нанесенні покриття контролювати і зберегти такі умови важко, так як такі параметри як швидкість переміщення оброблювального електрода щодо оброблюваної поверхні, зусилля його притиску до поверхні деталі задаються оператором і можуть коливатися, тобто по суті бути неконтрольованими. Для здійснення процесу електроіскрового легування при більш високому рівні контролю технологічних параметрів (в числовому вигляді) була розроблена установка (рис.1.15, 1.16), яка забезпечувала двокоординатну вібрацію обробного електрода, причому поперечна вібрація задавала ширину «доріжки» при механізованому формуванні покриттів з широким діапазоном регулювання параметрів технологічного процесу [26,28].

Стандартний віброзбудник 2 установки ALIER-31 був закріплений на вертикальній голівці фрезерного верстата таким чином, що він міг здійснювати осцилюючі коливання з регульованою амплітудою і частотою в напрямку, перпендикулярному руху супорта 5, на якому за допомогою гвинтів кріпився зразок 4. Амплітуда забезпечувалася спеціальним ексцентриком, укріпленим на вертикальному шпинделі верстата з можливістю регулювання його вильоту. Це

давало можливість отримувати на зразку «доріжку» покриття різної ширини. частота поперечної вібрації забезпечувалася швидкістю обертання вертикального шпинделя, яка теж регулювалася від 20 до 150 об / хв. Приводом шпинделя служив електродвигун 6 постійного струму, підключений до лабораторного автотрансформатора через діодний міст, що давало можливість не тільки регулювати частоту поперечної вібрації, а й контролювати її за допомогою вольтметра.



**Рис.1.15.** Модель установки електроіскрового легування для механізованого формування покриттів. 1-ALIER 31; 2-вібробудник; 3-4-зразок; 5-супорт установки; 6-регульований привід супорта; 7-станина установки; 8-регульований привід поперечного вібратора.



**Рис 1.16.** Установка електроіскрового легування для механізованого формування покриттів.

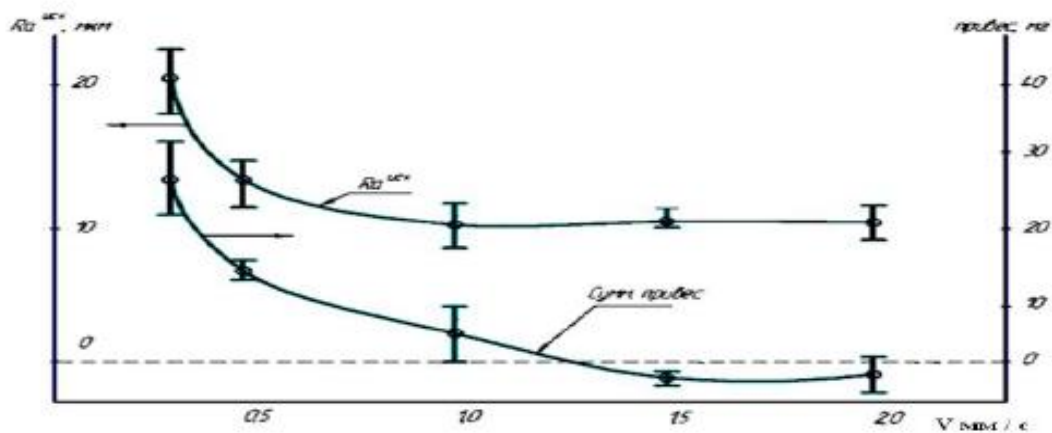


Зразок 4 за допомогою гвинтів кріпився на горизонтальному супорті 5 установки. Для його переміщення був виготовлений спеціальний привід 6 (електродвигун постійного струму, оснащений знижувальним редуктором), який забезпечував можливість регулювання швидкості. Двигун підключався до мережі через лабораторний автотрансформатор і діодний міст, вихідна напруга контролювалося вольтметром.

Установка забезпечувала при механізованому (а значить, стабілізованому по параметрам) нанесенні покриття можливість широкої зміни режимів по 6 параметрам.

При механізованому отриманні покриття шар виходить більш рівний і якісний, оскільки забезпечується більша стабільність, інтенсивність і однорідність механізованого процесу фіксуються і параметри поперечної вібрації, яка забезпечує ширину одержуваного шару покриття. Внаслідок цього суцільність, щільність та чистота поверхні шару механізованого електроіскрового легування краще, а продуктивність процесу вища, ніж при ручному нанесенні покриття. Ще однією перевагою механізованого нанесення покриття є хороша відтворюваність процесу, так як швидкість переміщення електрода по деталі або швидкість і величина поперечних вібрацій електрода визначається конкретним числовим параметром, а не умовним більше або менше при ручному нанесенні покриття. Відтворюваність процесу електроіскрового легування особливо важлива при багатошаровому нанесенні покриттів, коли потрібно отримати більш товстий шар при зниженій шорсткості. У деяких випадках для отримання якісного покриття потрібно використовувати такі параметри процесу (наприклад, стабільну швидкість або задану осциляцію), яку неможливо здійснити при ручному режимі. Розглядаючи графік (рис.1.17.), можна зробити такі висновки: - крива залежності шорсткості від швидкості переміщення електрода поверхнею зразка свідчить про зниження  $R_a$  від  $\sim 20$  мкм - при малих і до  $\sim 10$  мкм; - при високих швидкостях переміщення обробного електрода щодо поверхні зразка; - Мінімальна шорсткість після електроіскрового легування досягається при максимальній швидкості переміщення оброблювального електрода  $V=2 \cdot 10^{-3}$  м/с. За такої швидкості

відбувається лише «обшукування» (тобто свого роду модифікування без утворення приросту ваги) поверхні, яке у свою чергу дає такий кінцевий результат.



**Рис. 1.17.** Шероховатості і изменение веса образцов в зависимости от скорости перемещения электрода.

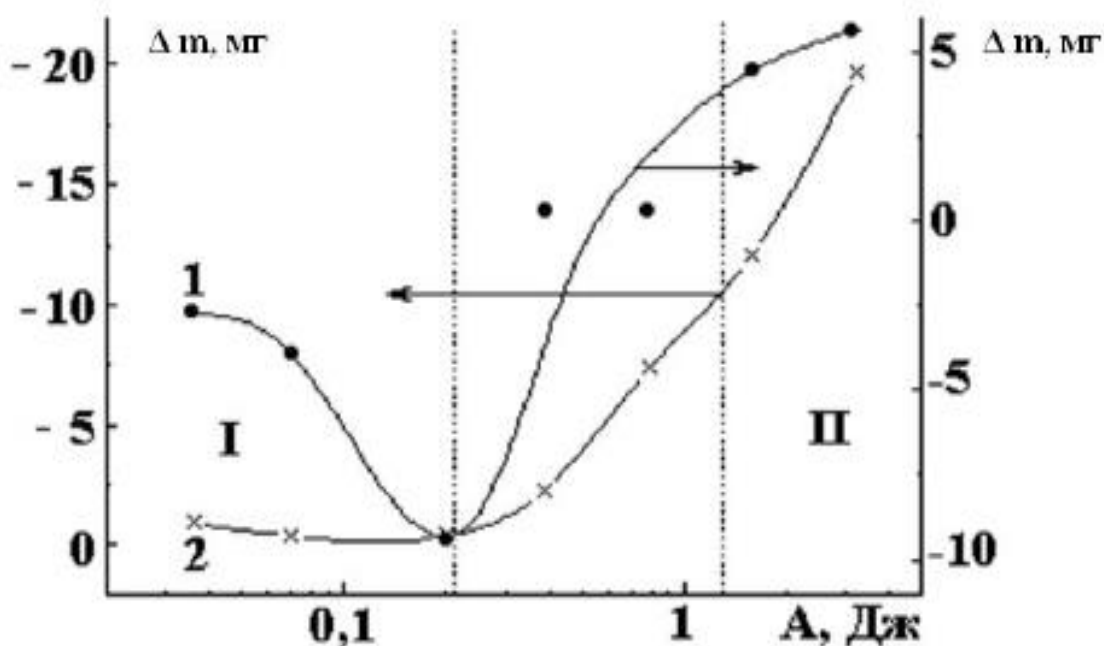
Порівнюючи показник шорсткості і параметр масопереносу речовини (рис 1.17.) видно, що перенесення речовини електрода, що руйнується на поверхню деталі, безпосередньо залежить від показників шорсткості і являє собою приблизно таку ж лінію на графіку, що і у показника шорсткості. Тобто, шорсткість одержуваної поверхні зразка при електроіскровій обробці буде максимальною за максимального приросту ваги і навпаки.

## 2. ВПЛИВ РЕЖИМІВ ЕІО, МАТЕРІАЛУ ЛЕГУЮЧОГО ЕЛЕКТРОДА НА ФАЗОВИЙ СКЛАД ПОКРИТТІВ

### 2.1. Вплив матеріалу легуючого електрода на фазовий склад покриттів, сформованих ЕІО.

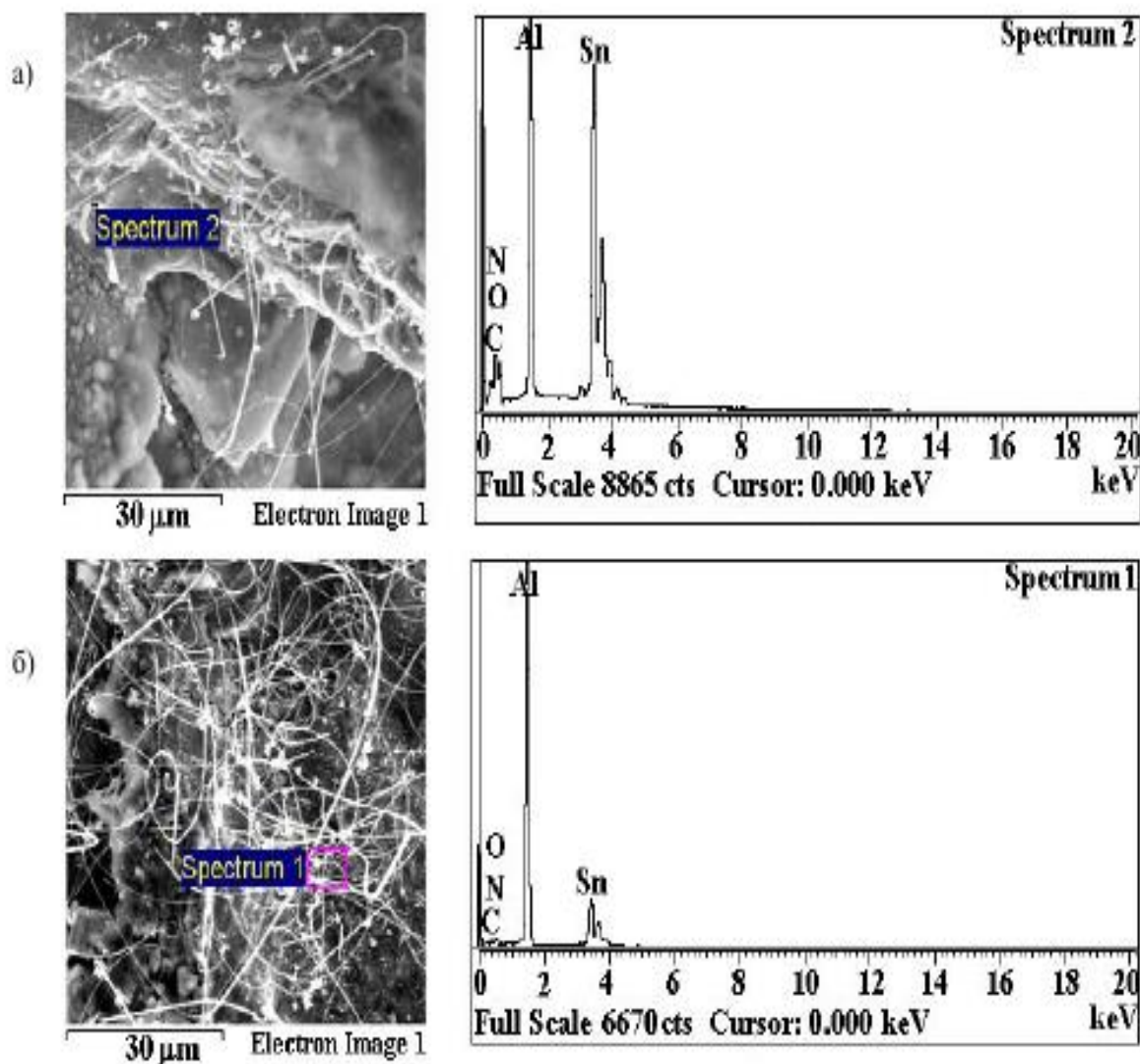
Для визначення ролі матеріалу зразка (алюмінієвий сплав або сталь) в освіті покриття алюмінієвого сплаву була проведена чергова серія випробувань. Покриття зі сплаву AlSn наносилося на сталевий зразок Ст3. Крім оптимального режиму (режим 6, коефіцієнт енергії 1.0) було вирішено перевірити і режим 4, так

як при нанесенні алюмінієвого покриття на сталь умови нанесення значно змінюються. Наносити покриття з чистого алюмінію можна, але з великими обмеженнями через сильне прилипання електродів до зразка. Навіть тонкі електроди діаметром 2 мм при 7 режимі настільки прилипають до зразка, що нанесення покриття стає дуже скрутним.



**Рис 2.1.** Узагальнений графік впливу енергії імпульсу зміну маси зразка (1) і оброблювального електрода (2).

На узагальненому графіку (рис 2.1) показані зміни у вазі як зразків, так електродів, при зміні режиму роботи установки для електроіскрового легування. Видно, що при відносно малих енергіях імпульсу має місце втрата у вазі зразка, що збільшується зі збільшенням енергії імпульсу. Це область I на рис. 2.2. У зазначеній області спостерігається відносно мала втрата у вазі електрода, що обробляє.



**Рис.2.2.** Морфологія поверхні та EDX-спектри оброблювального електрода(а) та зразка (б) після обробки у режимах 6 (а) та 7 (б).

Автори [5,17,20] у своїх роботах в якості електрода (анода) використовували білий чавун з добавками вольфраму в різному процентному співвідношенні, що дозволило збільшити працездатність робочих поверхонь сталі. Відзначено, що зі збільшенням вольфраму в анодном матеріалі ерозія і масо переніс збільшуються при утворенні тендітних карбідів. Однак, в якості електродних матеріалів для ЕІЛ, частіше використовують матеріали на без вольфрамової основі.

Серед таких матеріалів тверді сплави на основі карбіду титану, які характеризуються такими параметрами, як висока твердість, зносостійкість, тугоплавкість.

Автори [5-14] посвітили своє дослідження безвольфрамо і вольфрамівмісним електродним матеріалами.

Розробили і досліджували безвольфрамові електродні матеріали на основі карбіду титану з нікель-молібденової зв'язкою, модифіковані добавками датолітового концентрату CaB [SiO<sub>4</sub>] (OH) (ГОСТ 16108-80).

Так само в роботах досліджені створені безвольфрамові композиційні електродні матеріали з нікель-молібденової зв'язкою і добавкою борвмісної мінеральної сировини (датолітового концентрату) TiC-Ni-Mo-ДТК за допомогою яких, змогли отримати покриття на сталі 45 з високою мікротвердістю, збільшеною зносостійкістю і жаростійкістю.

Досліджені одношарові і двошарові покриття на жаростійкість. Як електродні матеріали були використані BK8, BK8 + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; BK8 + Cr. Використання цих електродних матеріалів так само дозволило домогтися збільшення мікротвердості, зносостійкості і жаростійкості. Ефективність процесу електроіскрового легування підвищиться, а саме збільшиться зносостійкість і твердість покриття, якщо знизити стійкість електродного матеріалу. Як добавки до твердого сплаву BK8 брали такі матеріали, як B, Si, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni і Cr.

В роботах [3,8] наводять результати дослідження впливу електроіскрового легування щодо підвищення зносостійкості, корозійної стійкості. Як матеріали електродів використовувалися перехідні метали IV-VI груп, Ti, Zr, Al, Ni, Cu і силуміновий Al-Si сплав.

Дослідники в роботах [3, 7] використовували електроди на основі BK8 з самофлюсуючими добавками Ni-Cr-B-Si. Даний електрод в процесі ЕІЛ дозволяє сформувати змінений поверхневий шар з мікротвердістю, яка перевершує величину сплаву BK8. Використання даного електрода дозволило знизити утворення оксидних і нітридних фаз, забезпечити кращу взаємодію матеріалів електродів і поліпшити умови формування легovanого шару за рахунок

максимальної дифузії анода і катода, а так само поліпшити експлуатаційні характеристики поверхневого шару (зносостійкість, жаростійкість і ін.).

В роботі [17] дослідники провели аналіз електродних матеріалів, запропонували класифікацію електродних матеріалів, які отримані з мінеральної сировини далекосхідного регіону. Автори [19] наводять приклади електродів (анодів), які часто використовуються в практиці для отримання покриттів, з різним призначенням.

Автор в роботі [19] досліджує зносостійкість твёрдосплавного металорізального інструменту з покриттям (TiAl) N, матеріал електрода по словами автора обраний з тим, що має підвищену термостійкість. В ході дослідження, з'ясувалося, що стійкість інструментів з даними покриттям збільшилася в 1,5-2,0 рази. На думку автора [8], використовуючи в якості матеріалів м'які матеріали, наприклад алюміній, дозволить підвищити поверхневу твердість оброблюваної деталі. В даному випадку велику роль відіграють хімічні сполуки, які з'являються в процесі електроіскрового легування. Високу твердість формованого шару, яка у багато разів перевищує твердість обробного анода і катода при електроіскровому легуванні титану алюмінієм і нікелем, пов'язують з тим, що утворюється ряд сполук (інтерметаллідів) між матеріалами анода і катода і з'єднань Ti з азотом і киснем повітря (нітридів і оксидів). У разі, коли хімічна активність твердість матеріалів електродів невелика, збільшення твердості обробленої поверхні обумовлюється структурними змінами і гартівними явищами і структурними змінами. Так само при електроіскровому легуванні сталей на твердість формованих шарів впливає попередня термообробка і хімічний склад. Наприклад, нормалізована сталь, при електроіскровому легуванні цієї ж сталлю і Cr, показує найбільш високі значення мікротвердості, в порівнянні з тією ж сталлю в стані поставки або з тією, яка поліпшена термічно.

В роботі [8] автори представили результати досліджень одношарових і двошарових покриттів на основі графіту і сплавів. В якості катода використовувалася сталь 25, як електродні матеріали були взяті: графіт, титан, 12X18H10T, X20H80. В ході дослідження автори з'ясували, що двошарові

покриття дозволяють значно підвищити механічні властивості конструкційних сталей. У роботі автори провели оцінку товщини «білого» шару, шорсткості отриманих покриттів і суцільності. Велика товщина «білого» шару виходить у двошарових покриттів, утворених в наступному порядку шарів: нижній шар (графіт) - верхній шар (сплав). Велика суцільність спостерігається у одношарового покриття сплаву X20H80. У випадку з шорсткістю одержуваного покриття, то її найменше значення простежується при освіті двошарового покриття: нижній шар (сплав) - верхній шар (Графіт). Таким чином, автори стверджують, що доцільно використовувати графіт як верхній шар при нанесенні покриттів, для значного зменшення шорсткості поверхневого шару.

Дослідники [3, 5, 8] також вимірювали точність профілю отриманої поверхні і його шорсткість. Електроіскровому легуванню піддали затискні механізми верстатного оснащення, які працюють в умовах високого ступеня зносу: цанги і мембрани. У момент виготовлення цанг до того, як розділити передній конус на пелюстки, внутрішня поверхня зміцнюючим шаром, ширина якого склала 5 мм і товщина 5 мкм. Стійкість цанг збільшилася в 2-3 рази. Робочу поверхню цанг можна відновити за допомогою подальшого нанесення покриття з доведенням з спеціального абразивного інструменту. Процес електроіскрового легування дозволив підвищити термін служби мембран для мембранних патронів в 4 рази.

В інших роботах [3,5] автори, застосовуючи електроди планки, змогли з'ясувати, що дані покриття сприяють зменшенню коефіцієнта тертя в два рази і підвищення зносостійкості в 10 разів

Автори роботи [3,14] в ході досліджень за утворенням зміненого поверхневого шару на сталі 35, змогли розділити електродні матеріали для нанесення покриттів на сталі на кілька груп, мідь при електроіскровому легуванні не утворює «білого» шару. У третю групу вони включили тугоплавкі елементи (Ti, V, Zr, Nb, Mo, Ta, W). Провели дослідження щодо впливу фізико-хімічних властивостей матеріалів електродів на структуру властивості одержуваного поверхневого шару, для того, щоб встановити закономірності утворення «білого»

шару при ЕІЛ стали 35.

Автори [3,8] у своїй роботі досліджують електродний матеріал бронзу, як варіант захисного покриття при електроіскровому легуванні стали 30ХГСН2А. Як анодів використовували бронзу марок ВБр5М і БрА10Ж3Мц2. Зразки з покриттям відчували на тертя. Результати експериментів свідчать про те, що покриття з бронзи підходить для деталей і ріжучих інструментів, які працюють в умовах тертя ковзання і високих навантажень. Так само автори відзначають, що ЕІЛ бронзами марок ВБр5М і БрА10Ж3Мц2 впливає на зниження значень малоциклової втоми сталі 30ХГСН2А.

В іншій роботі [2] автор досліджує вплив покриттів на основі нітриду титану на знос інструменту з твердого сплаву ВК8. В якості ЕМ використовувалися TiAlSi, TiAlZrN, TiAlCrN. Зміцненим інструментом обробляли заготовки з сталей 30ХГСА і 12Х18Н10Т. Після проведення дослідження автор з'ясував, що інтенсивність зносу інструменту при обробці сталі 30ХГСА стала менше в 1,3-1,8 рази, а при обробці 12Х18Н10Т в 1,2-1,7 рази.

Автори [11,14] застосували електроіскрове легування для нанесення покриттів на ріжучі деталі машин сучасних зернозбиральних технік. Електродами в ході дослідження служили нанокристалічний сплав марки 5БДСР і електрод з швидко загартованого аморфного сплаву марки 84КХСР. Після проведення дослідження, зробили висновок про те, що використання даних електродів сприяє підвищення зносостійкості протиріжучими пластин в два рази.

Дослідження по жаростійкості сталі марки 45 провів автор [17] використовуючи електроди з Ni і NiCr. Дослідження проводилося на сталі з покриттям і без покриття. Нанесення покриття NiCr на сталь сприяло істотно збільшити жаростійкість сталі .



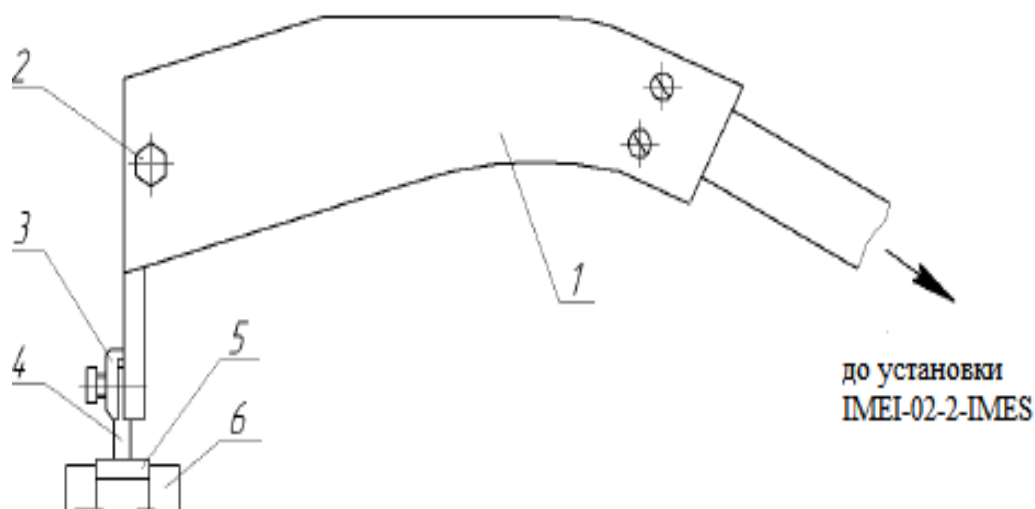
Таблиця 2.1 Приклади електродних матеріалів, що застосовуються для нанесення покриттів за допомогою електроіскрового легування, в залежності від призначення одержуваного покриття.

Матеріал електрода (анод)	Матеріал катода	Призначення одержуваного покриття
Al, TiAl, Ni <sub>3</sub> Al	ВК8, Сталь Ст. 3, Al, титановий сплав BT 18 та інші	Збільшення: окалинестійкості, зносостійкості, жаростійкості, корозійної стійкості
Мідь (Cu)	ВК8, Сталь 3, Al, Си, и другие	Збільшення теплопровідності, корозійної стійкості
Хром (Cr)	ВК8, Сталі 40X, 45 та інші	Збільшення зносостійкості, жаростійкості, окалинестійкості
Бронзи ВБр5М, БрБ2, БрА10ЖЗМц2,	Сталі 30ХГСН2А, 45, Р18, чавун та інші	Збільшення зносостійкості
СТІМ	Швидкорізальні і конструкційні сталі і інші	Збільшення зносостійкості
Графітні електроди	T15K6, сталь Р18, 25 і інші	Збільшення зносостійкості, стійкості різального інструменту
TiC, TiB <sub>2</sub> , ZrB <sub>2</sub>	Сталі 35, Р18, Р6М5, У8А, титан і інші	Збільшення зносостійкості, окалинестійкості
Mo	Сталі 30,45 і інші	Збільшення стійкості різального інструменту, корозійної стійкості.
Ni, NiCr	Сталі 45,40X та інші	Збільшення зносостійкості, жаростійкості, окалинестійкості
ВК2, ВК3	T15K6, сталі Р6М5, Р18 і інші	Збільшення зносостійкості, стійкості різального інструменту
ВК6М, ВК6	Сталі Ст.2,45, Р6М5 і інші	Збільшення зносостійкості
ВК8, ВК8+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; ВК8+Cr	Сталі 45, Ст.3,40 X, Р6М3, Р6М5 і інші	Збільшення зносостійкості, жаростійкості, мікротвердості .
T15K6	Сталі 45, У7, У8, Р6М5, Р18, чавун	Збільшення: зносостійкості
T14K8	Сталь 2x13 і інші	Збільшення: зносостійкості
T30K4	Сталь 40X, T15K6 Р18, Р6М5 і інші	Збільшення: стійкості різального інструменту
TiC-Ni-Mo-ДТК	Сталь 45	Збільшення: мікротвердості, жаростійкості, зносостійкості, стійкості різального інструменту
TiN, AlN, ZrN	Сталь 45, Ст.3 і інші	Збільшення: стійкості різального інструменту

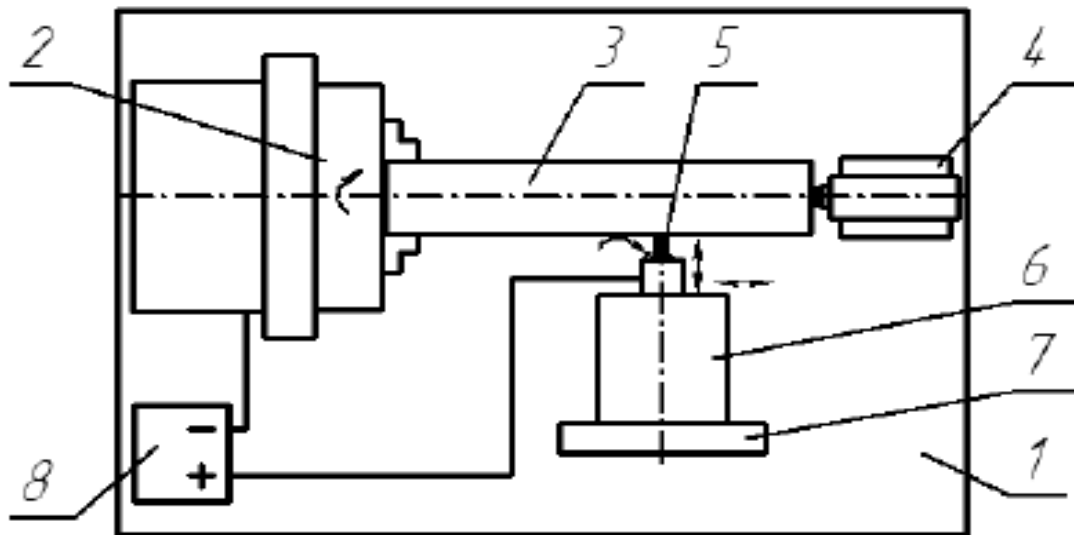
Так як перераховані технології порошкової металургії вимагають великі витрати енергії, часу, матеріалів і складного обладнання, багато авторів [15,22] пропонують в ці технології впровадити метод СВС (високотемпературний синтез). Дане суміщення дозволить зробити технології енергозберігаючими і ресурсозберігаючими. Дослідження впливу матеріалу легуючих електродів на фазовий склад покриттів, сформованих на зразках зі сталі 15ХГН2ТА, проводили методом рентгенофазового аналізу (РФА) [18,26].

Таблиця 2.2 Хімічний склад (%) і твердість сталі 15ХГН2ТА

C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	HB
0,13-0,18	0,17-0,37	0,7-1	0,7-1	1,4-1,8	0,03-0,09	269



**Рис.2.3.** Схема монтажу електрода і вібробудника зі зразком на установці ЕІО з ручним керуванням: 1 - вібробудник; 2 - кріпильний гвинт; 3 - тримач електрода; 4 - легуючий електрод; 5 - зразок; 6 – лещата.



**Рис. 2.4.** Схема установки для механізованого ЕІО: 1 - база токарного верстата; 2 - ізолюваний кулачковий патрон; 3 - оброблювана деталь; 4 - ізолювана задня бабка; 5 - легуючий електрод; 6 - механізована головка з супортом верстата; 7 - стежить система; 8 - генератор імпульсів.



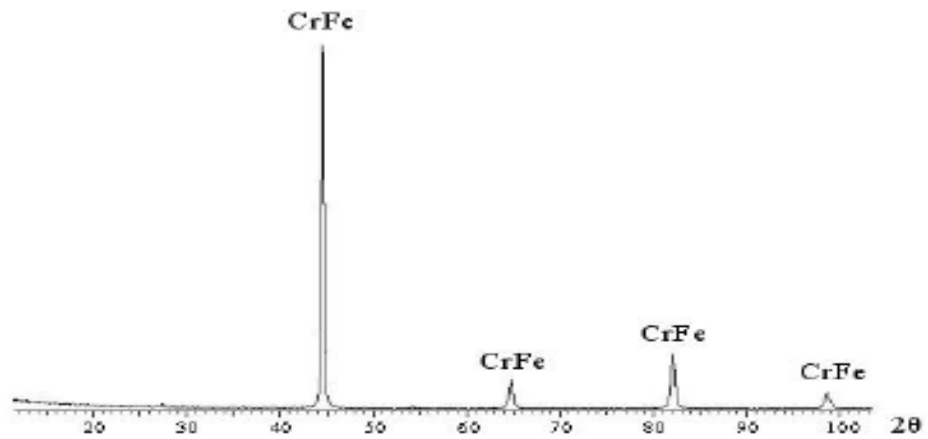
**Рис. 2.5.** Загальний вигляд і робоча зона механізованої установки ЕІО ІМЕІ-1001-ІМЕС на базі токарного верстата.

Технічні характеристики установки ІМЕІ-1001-ІМЕС наведені в таблиці 2.3 [28].

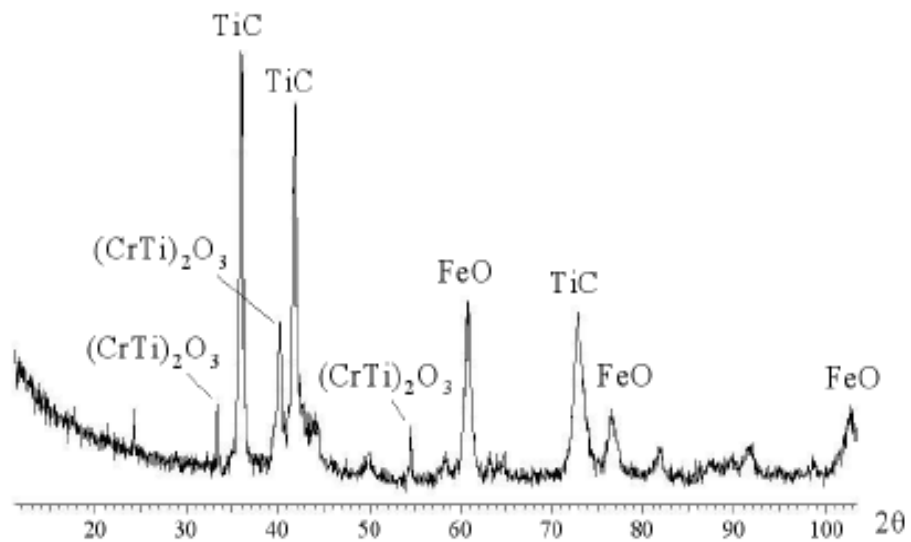
Таблиця 2.3. Технічні характеристики механізованої установки ІМЕІ-1001-ІМЕС.

Характеристика	Значення
Споживана потужність, кВ×А	1,0
Джерело живлення: напруга, В	220
частота, Гц	50
Продуктивність, см <sup>2</sup> /хв	3
Кількість режимів обробки	75
Напруга на конденсаторах, В	40-80
Частота імпульсів, Гц	200-600
Тривалість імпульсу іскри, мкс	2-200
Значення середнього струму, А	0,1-5
Маса генератора імпульсів, кг	18
Швидкість обертання деталі, об/хв	0,5-7
Швидкість поздовжньої подачі, мм/хв	0,5-2,5
Режими роботи	ручний, напівавтоматичний

З рентгенограм вихідних поверхонь сталевих зразків (рис. 2.6, 2.7) видно, що сталь 15ХГН2ТА містить чотири інтенсивних дифракційних максимуму, які відносяться до  $\alpha$ -Fe (ОЦК решітка). Розшифровка рентгенограм покриттів визначила наявність (TiC), що має кубічні ґрати з періодом  $a = 4,318 \text{ \AA}$ , а також фаз: (CrTi) 2O3 і FeO в незначній кількості (рис. 2.6). При цьому піків від кристалічних фаз вихідного матеріалу не спостерігається, легувального електрода і основи [29].



**Рис. 2.6.** Рентгенограма вихідних поверхонь зразків сталі 15XГН2ТА



**Рис. 2.7.** Рентгенограма поверхневого шару зразка сталі 15XГН2ТА, легованої електродом Т15К6 на режимах:  $U = 160\text{В}$ ,  $C = 34\text{мкФ}$ ,  $t = 4\text{ хв}$ .

Обробка рентгенограми ,модифікованому електродом ІМХ2 на режимах:  $U = 80\text{ В}$ ,  $C = 60\text{ мкФ}$ ,  $t = 3\text{ хв}$ , спостерігаються інтенсивні піки, відповідні складним інтерметалідам:  $\text{FeNi}_3$  з кубічної сингонії ( $a = 3,556\text{ \AA}$ ), [28].

Отримання зносостійких покриттів на алюмінії і його сплавах представляє великий науковий і практичний інтерес у зв'язку з дедалі ширшим його застосуванням у всіх галузях машинобудування: від авіації до сільського господарства. Тому вивчення процесів отримання зносостійких і довговічних покриттів на поверхні алюмінієвих сплавів, структури і властивостей отриманих покриттів є досить актуальним. Це дозволить виявити закономірності отримання

зносостійких покриттів на алюмінієвих сплавах і розробити програму з управління процесом електроіскрового легування з метою підвищення якості цих покриттів.

Алюмінієві сплави характеризуються такими параметрами [17]:

- низькою температурою плавлення (660С) і дуже високою температурою випаровування (2500С);

- низькою щільністю -2700 кг / м<sup>3</sup>;

- висока коефіцієнтом лінійного розширення  $22 \times 10^{-6}$  1/град перевищує коефіцієнт лінійного розширення сталі в 2 рази;

- відсутністю аллотропічних видозмін структури;

- наявністю на поверхні алюмінієвих сплавів щільної окисної плівки, володіє високим електроопору.

Ці параметри можуть мати значний вплив на властивості покриттів, одержуваних за допомогою електроіскрового легування на алюмінієвих сплавах, тому необхідно розглянути можливість коригування технології електроіскрового легування з урахуванням цих особливостей. Крім полярного ефекту, пов'язаного з властивостями матеріалів електродів і параметрами імпульсного розряду, на отримання покриття впливають:

- Властивості газового середовища, в якій протікають процеси електроіскрового легування;

- Величина міжелектродного проміжку;

- зміна властивостей поверхні електродів в процесі електроіскрового легування і т.д.

Велику кількість факторів, що впливають на процес електроіскрового легування, загальна критеріальна модель процесу електроіскрового легування ще не розроблена і тому режими отримання потрібно уточнювати експериментально. Для отримання покриттів на алюмінієвих сплавах з високою зносостійкістю можна використовувати два напрямки:

- отримання локальних товстостінних покриття, які мають наноструктури з зміцнюючих елементів зі збільшенням розміру оброблюваних деталей;

-отримання покриттів за рахунок модифікування (наноstrukturування) поверхні упрочнюючими елементами, що мають нанометровий розмір без зміни розміру деталі.

Перший напрямок може бути застосовано для відновлення і зміцнення зношених деталей з алюмінієвих сплавів, наприклад, відновлення посадочних місць під підшипники в корпусних деталях з алюмінієвих сплавів.

Отриманню товстошарового покриття на алюмінієвих сплавах за допомогою електроіскрового легування, перешкоджає руйнуванню покриття при його багатошаровому нанесенні. Як показує практика електроіскрового легування, досягнення максимальної товщини покриття ( $\sim 0,5$  мм) залежить від багатьох причин: енергії імпульсу, складу навколишнього середовища, хімічного складу і фізичних властивостей обох електродів і т.д. Відомо [13], що збільшення енергії імпульсу призводить до отримання покриття більшої товщини, але одночасно раніше досягається максимум перенесення матеріалу і настає його руйнування. В результаті експериментів розроблена [19,22] фізична модель обмеження товщини формованого шару покриття при електроіскрового легування. Зростання шару супроводжується накопиченням в ньому залишкових напруг і зміною фізико-хімічних і механічних властивостей оброблюваної поверхні. При електроіскровому легуванні в період проходження імпульсу струму виникає теплова хвиля, що створює імпульсні термічні напруги, які поступово наростають по міру зміни властивостей поверхні катода. При проходженні через шар металу імпульсних термічних напружень в місцях їх активної дії залишаються залишкові напруги. У момент часу, коли сумарна величина залишкових і термічних напруг перевищить межу міцності шару, що наноситься, починається його руйнування. При цьому спочатку зменшується зростання шару (процес електроіскрового легування як би стабілізується), а потім ріст припиняється зовсім і далі починається його руйнування, то є винесення матеріалу з поверхні катода перевищує кількість обложеного на ньому матеріалу з анода.

Відповідно до цієї моделі, з огляду на високу теплопровідність алюмінієвого сплаву, можна припустити, що в результаті впливу імпульсних

розрядів піки теплових хвиль будуть значно знижені, а, отже, зменшаться термічні напруги в поверхневому шарі. Це дасть можливість отримувати на алюмінієвих сплавах більш товсті шари покриття в порівнянні зі сталлю. До цього ж веде висока пластичність алюмінієвого сплаву, яка повинна знизити термічні напруги і відсунути поріг насичення в бік збільшення товщини одержуваного шару покриття. З іншого боку, виходячи з тієї ж моделі процесу електроіскрового легування, для зниження внутрішніх напружень в процесі обробки, необхідно зменшити тепловий вплив на поверхню виробу, тобто зменшити величину теплових хвиль, що виникають в процесі електроіскрового легування на поверхні покриття і в його товщині. Цього можна домогтися зниженням енергії іскрового розряду за рахунок зменшення тривалості впливу і збільшення пауз між ними (при збереженні амплітуди іскрового розряду), а для підвищення продуктивності електроіскрового легування можна використовувати високу частоту імпульсів 400ч1000Гц.

Підтвердженням сказаного вище може служити робота [27], в якій отримано шар покриття близько 1мм (бронза АЖ9-4 на сталь). В результаті проведення роботи встановлено, що для отримання товстошарових покриттів за допомогою електроіскрового легування необхідно дотримуватися три умови:

- підтримання на електроді - аноді температурного режиму в межах  $20 \pm 10\%$  від температури плавлення анода;
- використання режиму «загальмованого електрода», тобто не рухати електродом до отримання покриття необхідної товщини;
- використання режиму, коли перенесення матеріалу анода на катод проводиться не в паровій, а в крапельно-рідкій фазі.

Використання режиму перенесення матеріалу анода в крапельно-рідкій фазі і тим більше, режиму загальмованого електрода неминуче призводять до отриманню бугристого покриття. Тому для отримання товстостінного покриття на алюмінієвих сплавах з низькою шорсткістю і без подальшої механічної обробки (наприклад, розкочування) необхідно підбирати режими електроіскрового легування експериментально з урахуванням сказаного вище.



У роботі про особливості електроіскрового легування алюмінію і його сплавів [28] наводяться дані, які показують, що використання електродів з Al (а також інших металів Cu, Ni, Ti, Cr і ін.) не дають приросту на катоді, так як відбувається значне розпорощення матеріалу катода в міжелектродному простір, переважна над осадженням матеріалу з анода.

Дослідження з електроіскровому легування на сплавах Д16Т, АК 4 і інших електродами з різних елементів показали, що на алюмінієвих сплавах можна одержувати покриття з легкоплавких елементів Sn, Zn, Pb с температурою плавлення  $T_{пл} < T_{пл}$  алюмінію.

Легування ж елементами з  $T_{пл} > T_{пл}$  алюмінію призводить тільки до ерозії катода, тобто зменшення його маси. У той же час при електроіскровому легуванні алюмінієвих сплавів тугоплавкими анодами, незважаючи на знос матеріалу катода, частина матеріалу анода іноді досягає катода і осідає на його поверхні, утворюючи інтерметаліди [11,22]. При багаторазовій діє розряду на поверхні алюмінієвих сплавів виходить суцільна зміцнена зона, розташована нижче базової поверхні на 50-100мкм. Тобто, відбувається по суті модифікування поверхні алюмінієвого сплаву. При подачі в міжелектродний проміжок дисперсних матеріалів у вигляді порошку з тугоплавких матеріалів, картина отримання покриття на алюмінієвій поверхні значно змінюється: виходять покриття над базовою поверхнею підкладки, що пояснюється перерозподілом енергії імпульсів в міжелектродному проміжку на користь дисперсних частинок, які швидше розплавляються і переносяться на катод. При електроіскровому легуванні алюмінієвого сплаву в звичайній атмосфері чистим Zn [19], практично не відбувається окислення цинку. Покриття складається з чистого цинку і всього лише 3% вкраплень окису цинку. Відсутність окислення цинку можна пояснити короткочастністю процесу електроіскрового легування: час процесу становить 10-5с., а також високу хімічну стійкість цинку. Так як алюміній по ерозійної стійкості стоїть у ряді далі цинку (після Ni, Ti, Cr), то можна припустити, що при електроіскровому легуванні композиційними електродами (матриця-алюміній, включення - мікро - або наночастинки упрочнюючої фази) алюмінієві частинки

також будуть погано окислюватися і менше впливатимуть на зносостійкість покриття, ніж частинки зміцнюючої фази.

Дослідження вплив енергії розряду [8,19] на розподіл елементів Ti, Ni і Cr в покритті при електроіскровому легуванні алюмінію і сплавів на його основі (Д16Т, АЛ25) електродами з зазначених елементів показало, що Cr і Ti розподіляються в поверхневих шарах покриття нерівномірно. Зі збільшенням енергії розряду посилюється дифузія елементів з покриття в підкладку, і збільшується їх концентрація в підкладці. При цьому залежність коефіцієнта масо переносу від енергії розряду носить лінійний характер на відміну від сталевих зразків, покриття на яких зазвичай має максимум. На алюміній і його сплави (Д16Т) можна наносити не тільки легкоплавкі, але і тугоплавкі елементи типу Ti, Ni, Cr і отримувати відповідні покриття.

При електроіскровому легуванні Sn і Pb однойменними електродами на зразках покриття як такого не утворюється [5], так як вага катода постійно зменшується. зроблено висновок, що при електроіскровому легуванні однойменними електродами з низькими температурами плавлення, низьку тепло-і електропровідністю значного виплеску рідкої фази з анода не відбувається, хоча в'язкість і коефіцієнт поверхневого натягу розплавленого металу грають істотну роль.

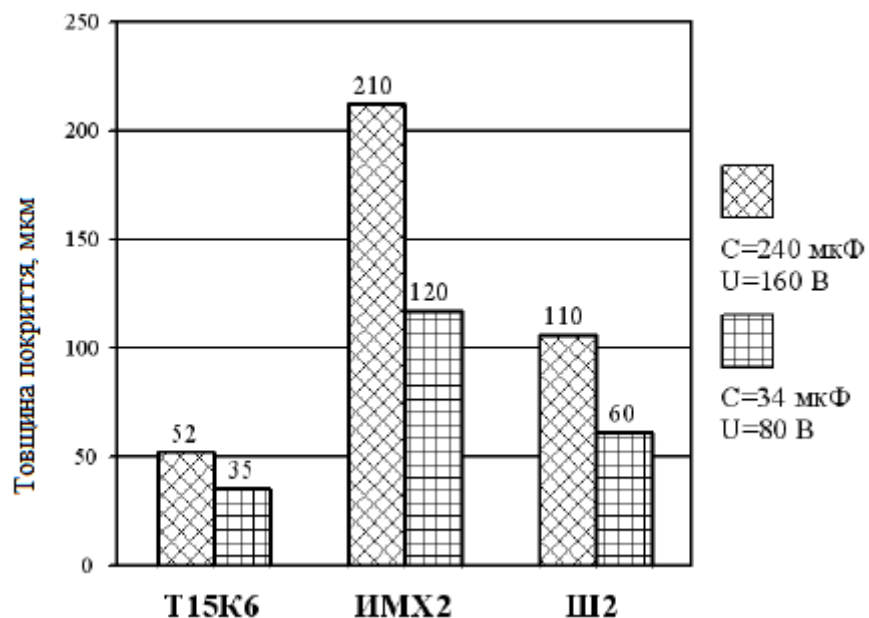
Для отримання покриття деякої товщини на катоді необхідно мати анод з низьким коефіцієнтом тепло- і електропровідності, а катод - навпаки, з високим. В цьому випадку рідка фаза з анода буде осідати на катоді, а не викидатися в міжелектродному простір. збільшенню рідкої фази на аноді сприяє його перегрів щодо катода.

Аналіз способів формування покриттів за допомогою електроіскрового легування вібруючим і обертовим електродом показав великі переваги останнього [21]. При вібрації анода крива залежності приросту катода (деталі) від часу має максимум і товщина формованого покриття в цьому випадку обмежена. Дослідженнями [20,22] встановлено, що при збільшенні тривалості обробки по досягненню незначного по товщині шару, поверхня деталі виявляється не в змозі

приймати матеріал з анода і сама починає руйнуватися [24]. При цьому неважливо, яким чином виходить покриття: за рахунок багат шарового послідовного нанесення або збільшення тривалості обробки одного і того ж місця на поверхні деталі. Виходячи з описаної вище фізичної картини отримання покриття за допомогою електроіскрового легування, можна припустити, що при отриманні багат шарового покриття шляхом проміжної термообробки (відпалу або відпустки) можна домогтися зниження внутрішніх напружень. Таким чином відсунути процес початку руйнування покриття в бік збільшення його товщини.

## 2.2. Вплив режимів ЕІЛ на мікротвердість і товщину формованих покриттів.

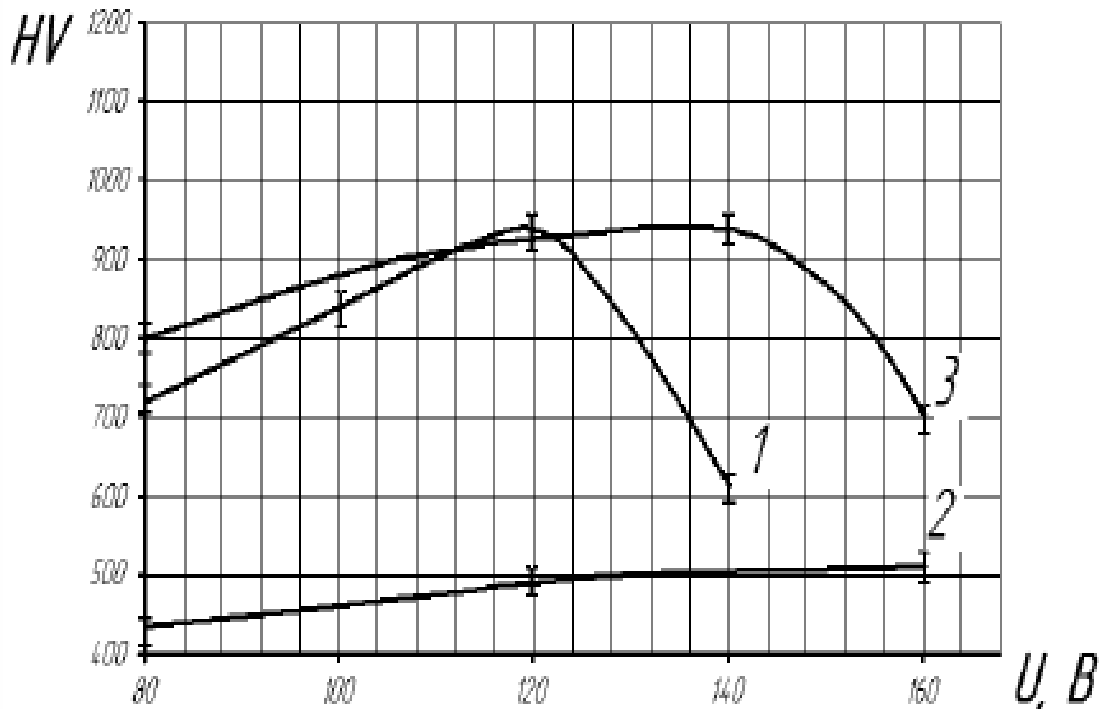
Дослідження впливу режимів ЕІЛ (анодно-катодного напруга; розрядна ємність конденсаторів; тривалість обробки) на товщину формованих покриттів проводили на зразках зі сталі 15ХГН2ТА, оброблених різними легуючими електродами. Результати дослідження товщини покриттів у вигляді діаграм наведені на рис. 2.8 [26].



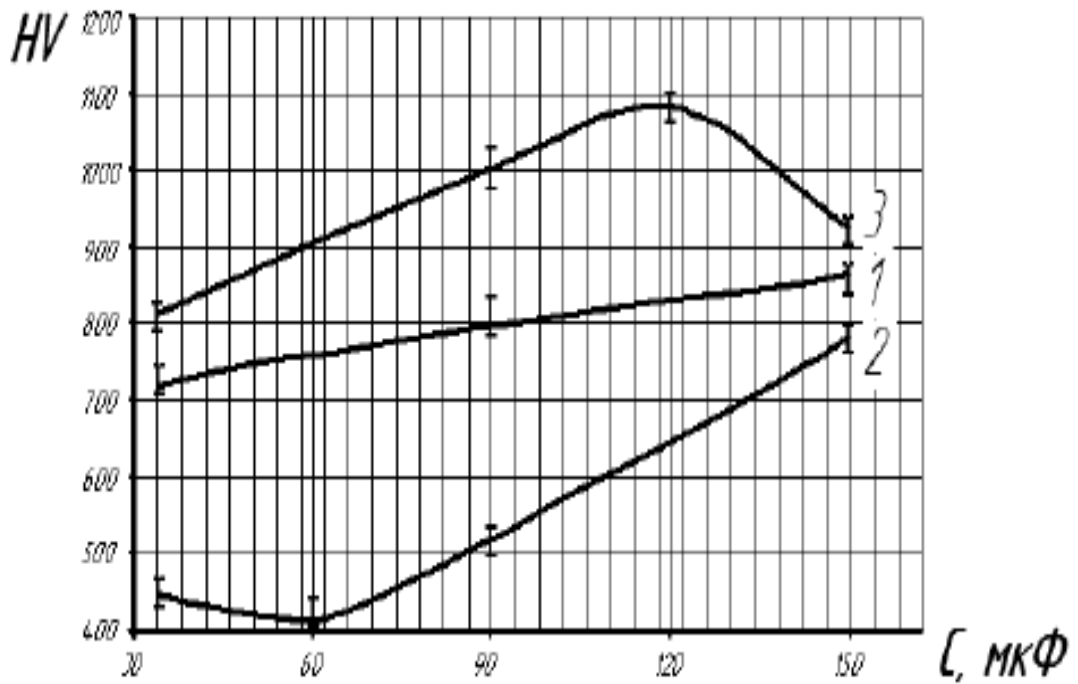
**Рис. 2.8.** Товщина покриттів зразків зі сталі 15ХГН2ТА при різних матеріалах електродів.

З отриманих діаграм видно, що з підвищенням енергетичних режимів ЕЮ: напруги від 80 В до 160 В і ємності від 34 мкФ до 240 мкФ товщина покриттів збільшується при будь-якому матеріалі легуючого електрода.

Вивчення характеру впливу енергетичних режимів електроіскровий обробки (анодно-катодного напруга, ємність конденсаторів) на мікротвердість формованих покриттів проводили на тих же зразках зі 15ХГН2ТА, оброблених електродами ІМХ2, Ш2 і Т15К6. Отримані залежно мікротвердості поверхневих шарів сталевих зразків від анодно-катодного напруги і розрядної ємності наведені на рис. 2.9 і 2.10.



**Рис. 2.9.** Залежність мікротвердості поверхневих шарів зразків, модифікованих різними електродами, від анодно-катодного напруги при  $C = 34$  мкФ: 1 - Т15К6; 2 - Ш2; 3 - ІМХ2.



**Рис. 2.10.** Залежність мікротвердості поверхневих шарів зразків, модифікованих різними електродами, від розрядної ємності при  $U = 80$  В: 1 - Т15К6; 2 - Ш2; 3 - ІМХ2.

З графіків на рис. 2.9 і 2.10 також видно, що найбільше підвищення мікротвердості забезпечується при ЕЮ електродом ІМХ2 з анодно-катодних напругою  $U = 140$  В. Подальше збільшення напруги призводить до різкого зниження мікротвердості поверхневого шару. Застосування електрода Ш2 дозволяє підвищити мікротвердість формованого покриття в меншому ступені, ніж застосування інших легуючих електродів.

Аналіз експериментальних залежностей мікротвердості покриттів сталевих зразків від напруги і розрядної ємності конденсаторів, показав, що рівень енергетичного впливу, який визначається значеннями цих параметрів, має неоднозначний вплив на механічні властивості (мікротвердість) формованого покриття і тонкого поверхневого шару.

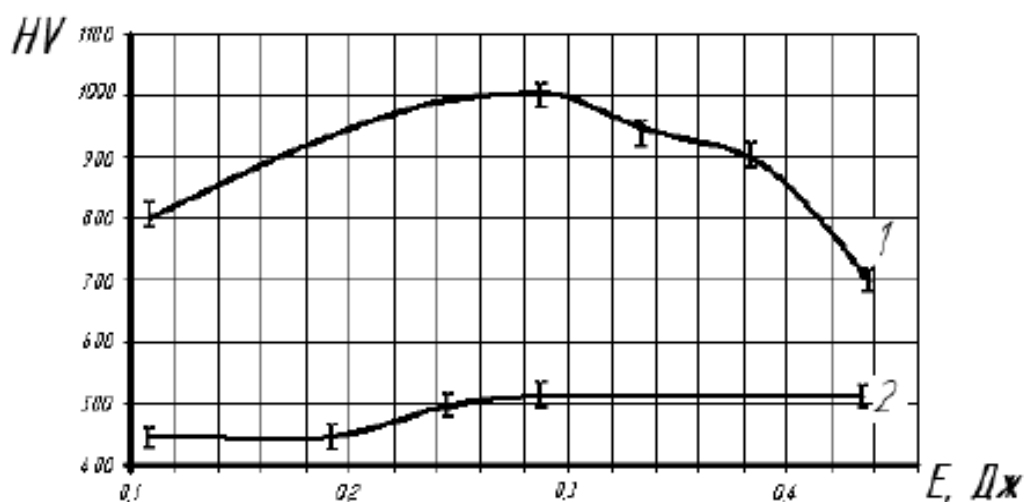
З метою визначення характеру сукупного впливу енергетичних режимів обробки на мікротвердість модифікованих поверхонь і покриттів були побудовані залежності  $HV = f(E)$  (рис. 2.9). Для цього були розраховані значення енергії

імпульсу [27]. для всіх режимів обробки електродами ІМХ2 і Ш2.

Результати розрахунку енергії та отриманих на цих режимах значення мікротвердості наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Мікротвердість покриттів, отриманих ЕІО на сталі 15ХГН2ТА при різному рівні енергії імпульсу (мікротвердість основи 248 HV)

ЛЕ	ІМХ2					Ш2				
Енергія імпульсу E, Дж	0,11	0,29	0,33	0,38	0,44	0,11	0,19	0,25	0,29	0,44
Мікротвердість HV, ±1%	800	1009	930	901	690	416	447	502	508	511



**Рис.2.11.** Залежність мікротвердості покриттів сталевих зразків від енергії імпульсу: 1 - ІМХ2; 2 - Ш2. (мікротвердість основи - 248 HV).

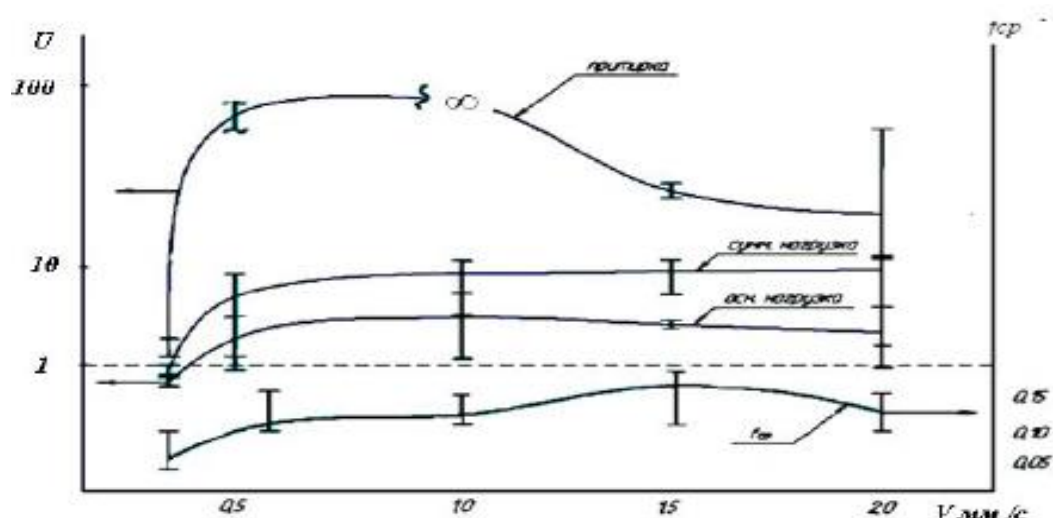
Графіки на рис. 2.11 наочно показують, що найбільш високі значення мікротвердості покриттів отримані на сталевих зразках, оброблених електродом ІМХ2 (крива 1).

Крім того, зі збільшенням енергії імпульсу мікротвердість поверхневого шару зразків збільшується до значення  $E = 0,29$  Дж незалежно від матеріалу легуючого електрода. При подальше підвищення енергії мікротвердість незначно знижується або залишається на колишньому рівні. Ці результати можна пояснити виходом на стаціонарний режим з приблизно однаковою інтенсивністю активаційних і

дисипативних енергетичних процесів в системі «легуючий електрод - оброблювана деталь».

Умова отримання максимальної шорсткості поверхні та максимального приросту ваги при електроіскровому легуванні не є необхідною умовою максимальної зносостійкості зразка.

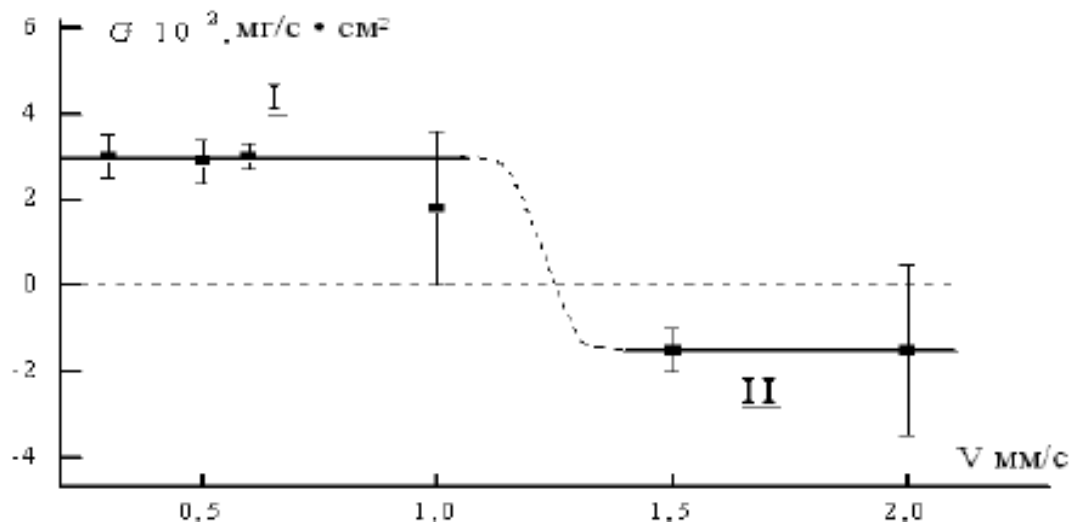
При досягненні максимальної шорсткості та максимального приросту ваги при електроіскровому легуванні (досліди при  $V=0,3 \cdot 10^{-3}$  м/с рис. 2.12 з максимальним приростом ваги і шорсткістю покриття) не досягається максимальна зносостійкість поверхні. У цих випадках відношення зносу контртіла до зносу покриття приблизно дорівнює 1. При інших швидкостях руху оброблювального електрода зносостійкість поверхні покриття, що спостерігається, істотно вище. Вона може бути високою, коли відбувається лише «обшукування» поверхні, при якому приросту ваги практично не спостерігається, але властивості поверхні кардинальним чином змінюються в результаті її модифікування. Зношування поверхні зразка в порівнянні зі ступенем зношування контртіла істотно менше в умовах приробітку, ніж при основних випробуваннях. В умовах підробітку використовується менше навантаження. Це означає, що ефект високої зносостійкості зразка в порівнянні зі зносостійкістю загартованої сталі повинен збільшуватися при малих навантаженнях.



**Рис. 2.12.** Залежність коефіцієнта зносу  $U$  та коефіцієнта тертя  $f$  від швидкості  $V$  переміщення оброблювального електрода щодо поверхні зразка.



На рис. 2.13 представлена залежність питомої швидкості обробки від швидкості переміщення оброблювального електрода щодо поверхні, що обробляється. Видно, що, незважаючи на розкид експериментальних даних і принципово різні способи обробки, питома швидкість обробки залишається незмінною в певному інтервалі швидкостей переміщення оброблювального електрода. Вона дорівнює  $\sim 3 \cdot 10^{-2}$  мг/с см<sup>2</sup> при малих швидкостях переміщення оброблювального електрода і  $\sim 2 \cdot 10^{-2}$  мг/с см<sup>2</sup> при високих. Перехід від обробки методом 1 до обробки методом 2 змінює тільки те “критичне” значення швидкості переміщення оброблювального електрода, при якому спостерігається перехід від режиму електроіскрового легування, що супроводжується вагою зразка, що піддається обробці.

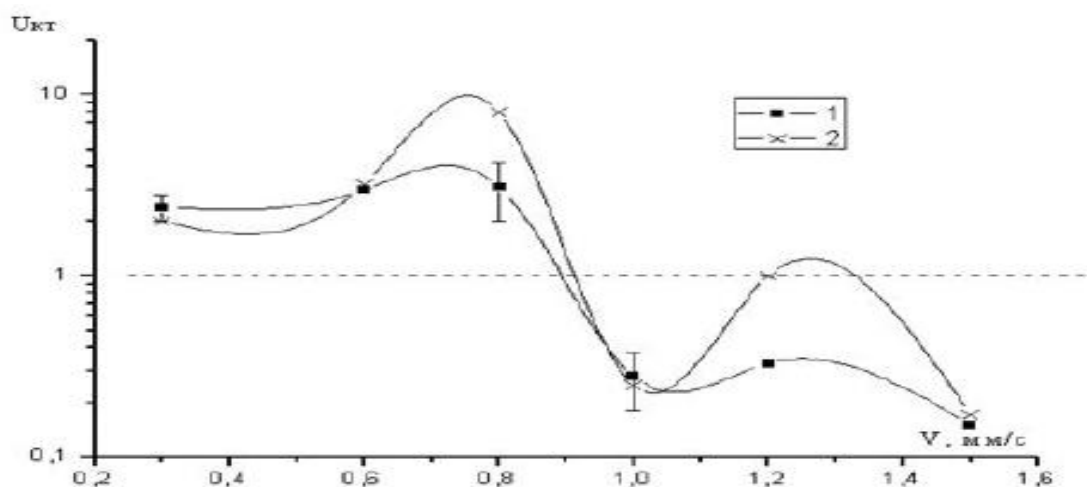


**Рис.2.13.** Залежність швидкості обробки від швидкості переміщення оброблювального електрода щодо поверхні, що обробляється.

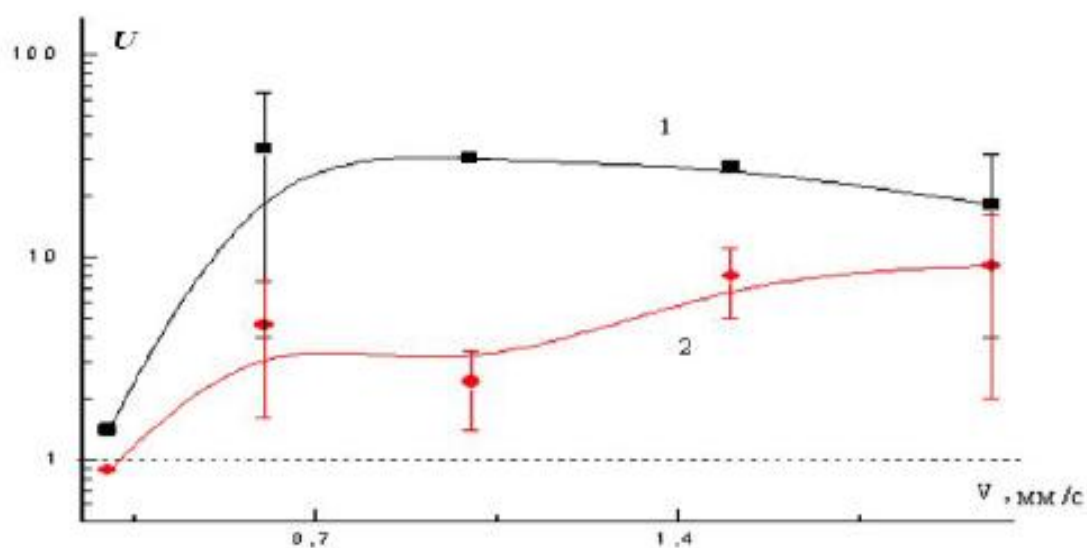
Результати зносних випробувань показали, що величина коефіцієнта зносу  $U$  за умови, що обробка відбувається в режимі I (тобто при нарощуванні поверхні), дійсно може бути більшою за одиницю (швидкість зносу контртіла перевищувала в 2-3 рази швидкість зносу обробленої поверхні, рис.2.14). Після 1 години випробувань знос контртіла майже на порядок міг перевищувати знос обробленої поверхні (рис.2.15). Однак при вищих значеннях швидкості переміщення оброблювального електрода ефект не спостерігався. Перехід від значень  $U_{кт} > 1$  до



значень  $U_{ктБ} < 1$  відбувається за таких швидкостях переміщення електрода поверхні зразка, у яких спостерігається перехід до режиму «обшукування» тобто. без отримання збільшення шару покриття (рис.2.15).



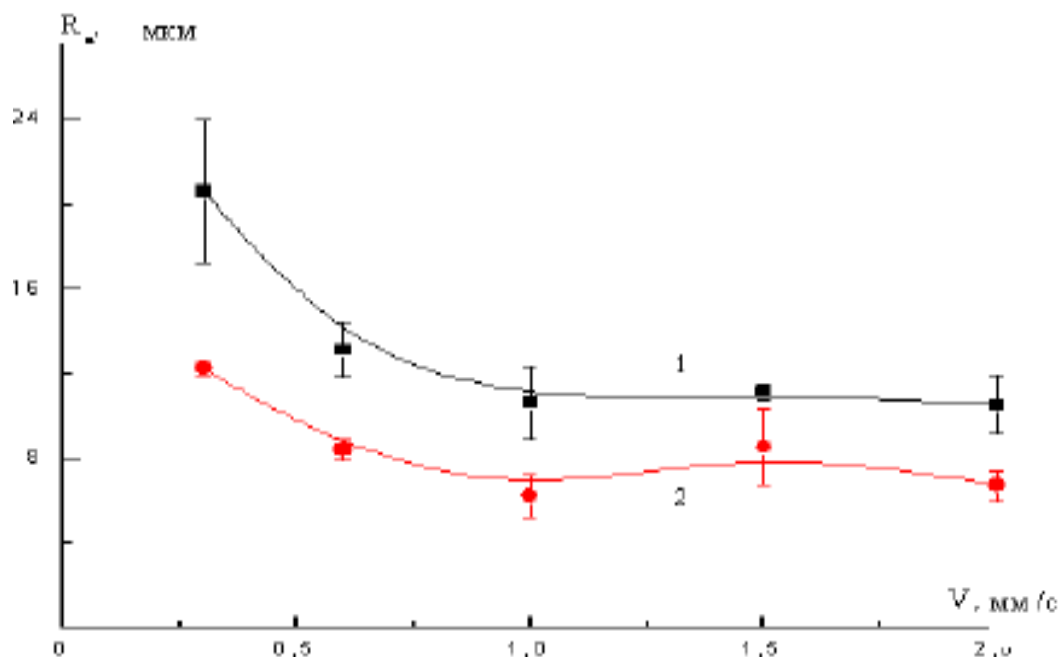
**Рис.2.14.** Залежність відносної швидкості зносу контртіла із загартованої сталі від швидкості переміщення оброблювального електрода після 5 годин (1) та 1 години (2) випробувань.



**Рис.2.15.** Вплив швидкості переміщення оброблювального електрода щодо оброблюваної поверхні на величину відносного зносу контртіла при терті в мастилі з обробленими методом електроіскрового легування поверхнями після опрацювання (1) та після двох етапів випробувань (2).

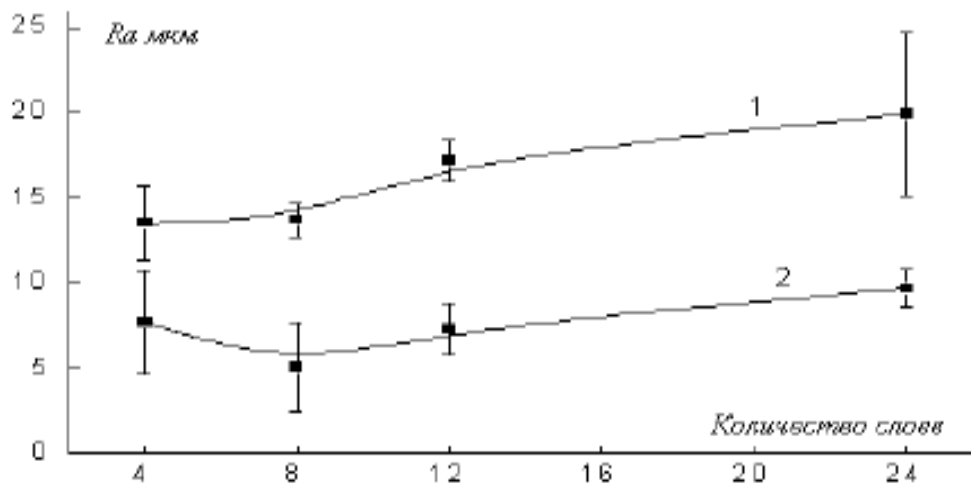
Шорсткість, а також вимірювання ваги зразка та контртіла проводилися як після

першого етапу випробувань (з меншим навантаженням), так і після закінчення випробувань (рис.2.16).



**Рис.2.16.** Зміна шорсткості поверхонь, отриманих після електроіскрового легування (1) і після зносних випробувань (2) в залежності від швидкості переміщення оброблювального електрода щодо поверхні, що обробляється при отриманні покриттів.

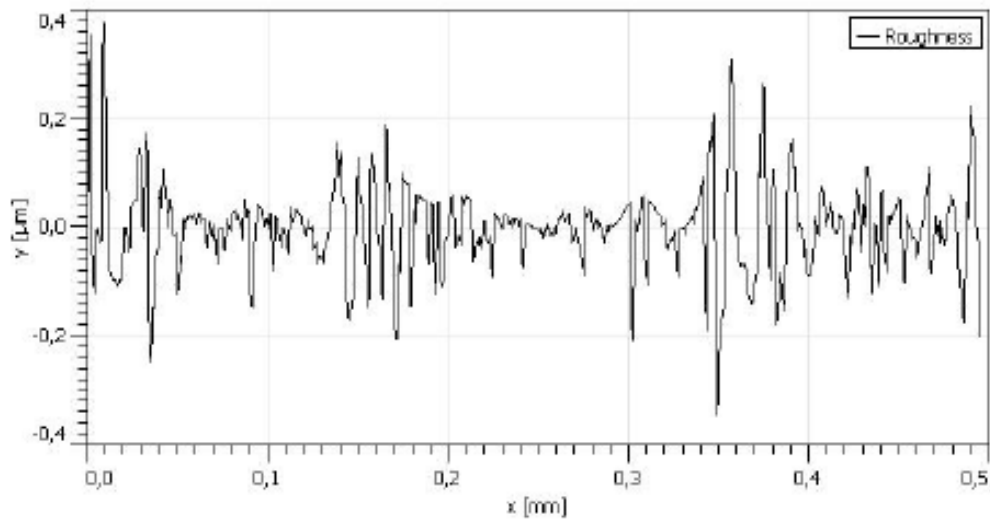
Результати представлені на рис. 2.17 дозволяють укласти: - в умовах механізованого нанесення електроіскрових покриттів також спостерігається ефект аномального зносу контртіла із загартованої сталі; - ефект спостерігається незалежно від того, чи відбувається збільшення шару (режим I) або обробка відбувається з втратою у вазі оброблюваної поверхні (режим II "обшукування"). Дійсно, при випробуваннях покриттів з максимальною шорсткістю ( $V = 0,3 \cdot 10^{-3}$  м/с) знос контртіла близький до величини зносу покриття, у той час як для покриттів, отриманих при більш високих швидкостях переміщення оброблювального електрода, знос контртіла на порядок і перевищує знос покриття (рис. 2.17).



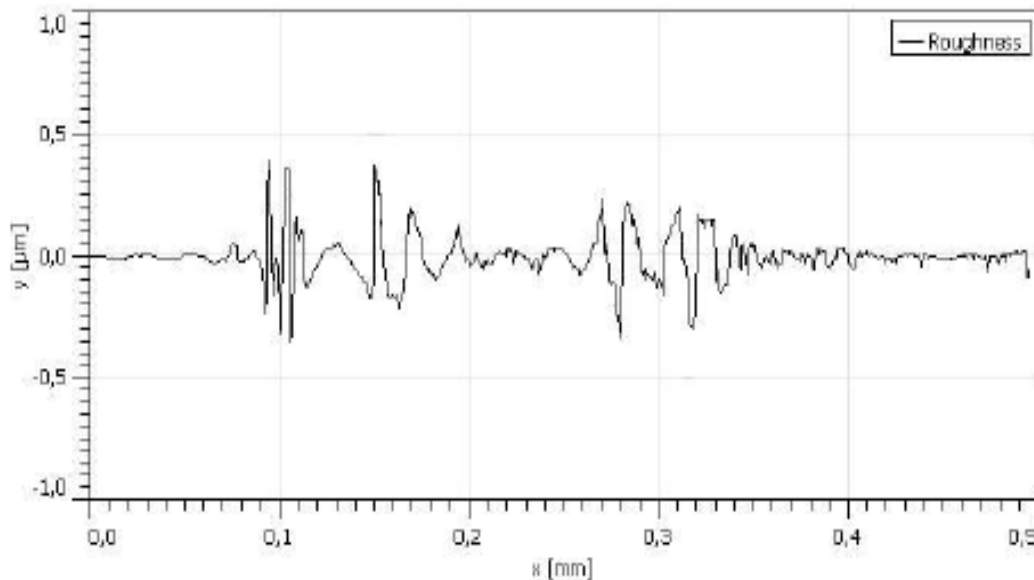
**Рис. 2.17.** Залежність шорсткості поверхонь від кількості шарів після електроіскрового легування (1) та після електроіскрового легування та механічної деформації (розкочування) (2).

Електроіскрова обробка сталевих зразків електродом Ш2 дозволяє підвищити мікротвердість формованого покриття приблизно в 1,7-3 рази в порівнянні з основою, але в меншій мірі, ніж при обробці електродами інших марок. ЕІЛ іншими електродами (на основі карбиду вольфраму з мікролегуючими елементами) забезпечує підвищення мікротвердості поверхневих покриттів на сталі 15ХГН2ГА приблизно в 2,8-4 рази в порівнянні з основою. Найбільше збільшення мікротвердості забезпечується при електроіскровій обробці легуючим електродом ІМХ2 з енергією імпульсу  $E = 0,29$  Дж.

Максимальна товщина покриття 210 мкм також отримана при обробці цим легуючим електродом. Отже, отримані результати дозволяють рекомендувати ЕІО вищевказаними легуючими електродами для підвищення мікротвердості поверхневих шарів і відновлення зношених поверхонь деталей вузлів тертя машин. Дослідження топографії поверхонь після електроіскрової обробки (рис.2.18., 2.19.)



**Рис. 2.18.** Профіль поверхні вихідного зразка зі сталі 15ХГН2ТА.



**Рис. 2.19.** Профіль поверхні зразка зі сталі 15ХГН2ТА після ЕЮ електродом Т15К6 на режимах:  $U = 120\text{В}$ ,  $C = 34\text{ мкФ}$  ( $E=0,25\text{Дж}$ )

Аналіз отриманих профілів поверхонь зразків і розрахованих по ним параметрів шорсткості досліджуваних поверхонь показує, що параметри:  $R_a$  (середнє арифметичне відхилення профілю),  $R_p$  (висота найбільшого виступу) і  $R_v$  (глибина найбільшої западини) змінюються в Залежно від матеріалу легуючого електрода.

Таблиця 2.4. Параметри поверхні вихідного і модифікованих зразків

Зразок / Параметр	Характерний розмір структури D, нм	Ra, мкм	Висота найбільшого виступу профілю R <sub>p</sub> , нм	Глибина найбільшої впадини профілю R <sub>v</sub> , нм
Сталь 15ХГН2ТА (вихідна)	2000-2500	≈1,6	379,0	344,8
Покриття ЛЕ Т15К6	200-250	≈2,5	477,3	378,5
Покриття ЛЕ Ш2	150-200	≈3,2	504,1	485,7
Покриття ЛЕ ІМХ2	250-300	≈6,3	538,3	484,4

### 3. ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

#### 3.1 Технологія ремонту посадочних місць під підшипники в корпусних деталях з алюмінієвих сплавів.

Отриманню товстошарового покриття на алюмінієвих сплавах за допомогою електроіскрового легування перешкоджає руйнування покриття при його багатошаровому нанесенні. Як показує практика електроіскрового легування, досягнення максимальної товщини покриття (~0,5 мм і більше) залежить від багатьох причин: енергії імпульсу, складу доквілля, хімічного складу та фізичних властивостей обох електродів тощо. Збільшення енергії імпульсу [31] призводить до отримання покриття більшої товщини, але одночасно раніше досягається максимум перенесення матеріалу і настає його руйнування. Використання режиму перенесення матеріалу анода в краплинній фазі і тим більше режиму загальмованого електрода неминуче призводять (як показали наші дослідження) до отримання горбистого покриття. Тому для отримання товстостінного покриття на алюмінієвих сплавах з низькою шорсткістю та без подальшої механічної обробки (наприклад, розкочування) необхідно підбирати режими

електроіскрового легування експериментально. При отриманні грубої поверхні покриття змінюють полярність електродів та повторюють обробку. При певному режимі обробки відбувається зняття «гребінців» із поверхні деталі, тобто протікає процес типу електрополірування. Після такої обробки сталі виходить параметр шорсткості поверхні  $Ra=6,3\pm 3,2\text{мкм}$ . Аналіз способів формування покриттів за допомогою електроіскрового легування віброуючим і обертовим електродом показав великі переваги останнього [6]. При вібрації анода крива залежності приросту ваги катода (деталі) від часу має максимум і товщина формується покриття в цьому випадку обмежена.

Дослідження [6,9] показали, що склад одержуваних покриттів, а також їх властивості повинні в значній мірі залежати від умов взаємодії обробного електрода з поверхнею деталі, оскільки подібні умови визначають контрольованість параметрів обробки. Однак при ручному нанесенні покриття контролювати і зберегти такі умови важко, так як такі параметри як швидкість переміщення обробного електрода щодо оброблюваної поверхні, зусилля його притиску до поверхні деталі задаються оператором і можуть значно коливатися, тобто по суті бути неконтрольованими.

Механізоване нанесення покриттів дає значні переваги в порівняно з ручним способом. При механізованому отриманні покриття шар виходить більш рівний і якісний, так як забезпечується більша стабільність, інтенсивність і однорідність механізованого процесу, фіксуються і параметри поперечної вібрації, яка забезпечує ширину одержуваного шару покриття.

Внаслідок цього суцільність, щільність і чистота поверхні шару механізованого електроіскрового легування краще, а продуктивність процесу вище, ніж при ручному нанесенні покриття.

Ще однією перевагою механізованого нанесення покриття є хороша відтворюваність процесу, так як швидкість переміщення електрода по деталі або швидкість і величина поперечних вібрацій електрода визначається конкретним числовим параметром, а не умовним «більше» або «менше» при ручному нанесенні покриття.

Відтворюваність процесу електроіскрового легування особливо важлива при багат шаровому нанесенні покриттів, коли потрібно отримати, більш товстий шар при зниженому шорсткості. У деяких випадках для отримання якісного покриття потрібно використовувати такі параметри процесу (наприклад, стабільну швидкість або задану осциляцію), яку при ручному режимі здійснити неможливо.

При випробуванні на зносостійкість при терті в маслі знос контртіла з загартованої сталі перевищує знос зразка зі сплаву Д1 з покриттям ~ в 6...7 раз і на порядок перевищує зносостійкість сплаву Д1 без покриття [7,26].

При мінімальній швидкості обробки досягається максимальне збільшення шару покриття і максимальна шорсткість поверхні, але при цьому не досягається максимальна зносостійкість. Найбільш висока зносостійкість виходить при високій швидкості обробки, коли відбувається «обискрівання» поверхні, при якому приросту не спостерігається, але властивості поверхні змінюються в результаті її модифікування.

Ефект перевищення зносу контртіла в порівнянні з зносом покриття, отриманого шляхом електроіскрового легування і обумовленого наявністю мікро – та нанониток з SnO, спостерігається як при терті в маслі, так і при терті без змащення, при різних режимах обробки. Однак в умовах тертя без змащення він досягає максимальної величини при обробці поверхні в режимі «обискрівання» і сталості енерговводу в іскровий проміжок (при високих швидкостях переміщення обробного електрода і більшої тривалості електроіскрового впливу).

Випробування за схемою «ролик-колодка» в умовах тертя в смазочно-охолоджуючої рідині показали, що зразки з покриттям зі сплаву Al-Sn в ~ 10 разів вище зносостійкості контртіла із загартованої сталі, а при терті без змащення - всього в ~ 3 рази. Встановлено, що мікротвердість покриття після ізносних випробувань в мастильно - охолоджуючої рідині практично не змінилася, а після випробувань в умовах тертя без змащення мікротвердість збільшилася в два рази в порівнянні з початковою. Це означає, що відбулася зміна структури покриття в результаті утворення оксидів елементів, що містяться в

покритті.

Встановлено, що в результаті випробувань у відносно «м'яких» умовах тертя (невисока навантаження при відносно низькій швидкості ковзання) визначальну роль в підвищенні зносостійкості покриття грають мікро - та нанонити з оксидів олова, а в умовах «жорстких» випробувань (високі навантаження і швидкості) роль мікро - і нанониток нівелюється, і визначальну роль відіграє оброблена методом електроіскрового легування матриця .

Випробування на зносостійкість показали, що знос покриття зі сплаву Al-Pb в кілька разів менше зносу контртіла із загартованої сталі, що підтверджує можливість отримання зносостійких покриттів за допомогою електродів, що мають структуру механічної суміші, що складається з вогнетривкої матриці і рівномірно розподіленого в ній, у вигляді сітки, легкоплавкого компонента.

При зносі 85% деталей машин стають непридатними, що не перевищують  $(0,2 \dots 0,3) \cdot 10^{-3}$  м. [4,35], причому переважна більшість відновлюваних деталей (близько 80%) - має максимальний знос до  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м.

Такою ж статистикою схильні алюмінієві підшипникові щити електродвигунів, алюмінієві кришки електрогенераторів, посадочні місця підшипників в корпусах насосів з алюмінієвих сплавів і інших пристроїв різного типу.

За статистикою серед всіх відновлюваних поверхонь автотракторних деталей близько 40% становлять зношені отвори [35]. Так як хімічний склад алюмінієвих деталей, умови роботи, діаметри отворів, в тому числі посадочних місць під підшипники, у різних деталей різні, то різняться способи відновлення

Широко використовуються способи відновлення алюмінієвих деталей машин, з яких 70% складають різні види зварювання і наплавлення [35,36], не завжди ефективні по наступних причин:

- не забезпечують зміцнення зношених поверхонь;
- ведуть до викривлення деталей через підведення великої кількості тепла, що вимагає подальшої додаткової механічної обробки.

Тому впровадження нових, прогресивних способів ремонту алюмінієвих



деталей є досить актуальним.

Перспективним способом відновлення зношених поверхонь деталей з алюмінієвих сплавів [34] є отримання покриття заданої товщини шляхом електроіскрового легування. Такі покриття мають високу зносостійкість, мають просте апаратне забезпечення і легко наносяться на зношені деталі в умовах ремонтних майстерень, і навіть в польових умовах.

Для практичного впровадження розроблених технологій вибрано два напрямки робіт: - ремонт посадочних місць під підшипники в деталях з алюмінієвих сплавів, в тому числі на прикладі підшипникових щитів електродвигунів, кришок генераторів і насосів.

Кришки електрогенераторів і підшипникові щити електродвигунів є важливими деталями, т. к. відмови цих вузлів ведуть до простоїв техніки, зростання витрат на ремонт і т.д. Тому підвищення довговічності підшипникових вузлів шляхом відновлення посадочних місць підшипників є актуальним завданням.

Ресурс більшості підшипників кочення, що застосовуються в підшипникових вузлах електродвигунів і електрогенераторів, становить в середньому 3000 годин і багато в чому залежить від посадок підшипників в корпусних деталях. Збільшення зазору між зовнішнім кільцем підшипника і посадковим місцем у вузлі погіршує розподіл навантаження між тілами кочення, що призводить до зниження довговічності підшипника. Таке збільшення зазору виникає, в основному, за рахунок зношування посадкового місця в результаті фреттинг-корозії.

При надходженні електродвигунів і електрогенераторів в ремонт дефекти розподіляються наступним чином: 50% - механічні пошкодження, інші 50% - дефекти електричної частини. При цьому 30% всіх ремонтуємих електродвигунів і електрогенераторів мають підвищений знос посадочних місць.

Причинами зазначених дефектів є:

- вихід з ладу підшипників або їх неякісна робота;
- підвищена вібрація через дисбалансу ротора або приводяться механізмів;

- неякісне центрування двигуна з наведеними агрегатами;
- природний знос металу підшипників;
- недостатнє зміцнення посадкового місця;
- перегрузка механічної частини, що виникають ударні навантаження з боку приводу;

- багаторазове розпресування і напресовування підшипників, що призводить до порушення рівномірності зазору між ротором і статором, виникнення підвищеної вібрації з відповідними негативними наслідками.

Несправність посадочних місць під підшипники зазвичай визначається шляхом діагностування працюючого електродвигуна на спеціальному стенді.

Посадочні місця під підшипники в корпусах і деталях з алюмінієвих сплавів відновлюються наступними способами:

- установка додаткових деталей - втулок;
- аргоно - дугового наплавленням;
- нанесення електролітичних покриттів;
- нанесення полімерних покриттів на основі анаеробних герметиків.

Перераховані способи мають загальні недоліки: складність технологічного процесу, потреба в дорогому обладнанні, внаслідок чого підвищується трудомісткість і собівартість, збільшується витрата матеріалів, необхідних для відновлення посадочних місць.

Більшість вищенаведених способів не можуть забезпечити необхідний ресурс відремонтованих електродвигунів, електрогенераторів і насосів.

Таблиця 3.1. Восстановлення посадочних місць під підшипники

	Найменування	Діаметр отвору вихідний мм	Допустимий розмір мм (посадка К6 / 16)	Діаметр отворів	
				після нанесення покриття	після механічної обробки
1	Кришка генератора автомобіля	$35^{+0.15}_{+0.12}$	$35^{+0.018}_{-0.008}$	$35^{+0.18}_{-0.17}$	$35^{+0.012}$
2	Кришка генератора автомобіля	$35^{+0.20}_{+0.08}$	$35^{+0.018}_{-0.008}$	$35^{+0.19}_{-0.16}$	$35^{+0.01}$
3	Кришка генератора автомобіля	$35^{+0.18}_{+0.15}$	$35^{+0.018}_{-0.008}$	$35^{+0.22}_{-0.16}$	$35^{+0.01}$
4	Кришка водяного насоса	$35^{+0.14}_{+0.06}$	$35^{+0.018}_{-0.008}$	$35^{+0.20}_{-0.14}$	$35^{+0.01}$
5	Кришка водяного насоса	$35^{+0.38}_{+0.12}$	$35^{+0.018}_{-0.008}$	$35^{+0.18}_{-0.16}$	$35^{+0.014}$
6	Кришка водяного насоса	$35^{+0.15}_{+0.12}$	$35^{+0.018}_{-0.008}$	$35^{+0.24}_{-0.20}$	$35^{+0.006}$
7	Кришка водяного насоса	$47^{+0.25}_{+0.12}$	$47^{+0.018}_{-0.008}$	$47^{+0.21}_{-0.18}$	$47^{+0.012}$
8	Кришка насоса	$47^{+0.31}_{+0.18}$	$47^{+0.018}_{-0.008}$	$47^{+0.25}_{-0.19}$	$47^{+0.006}$

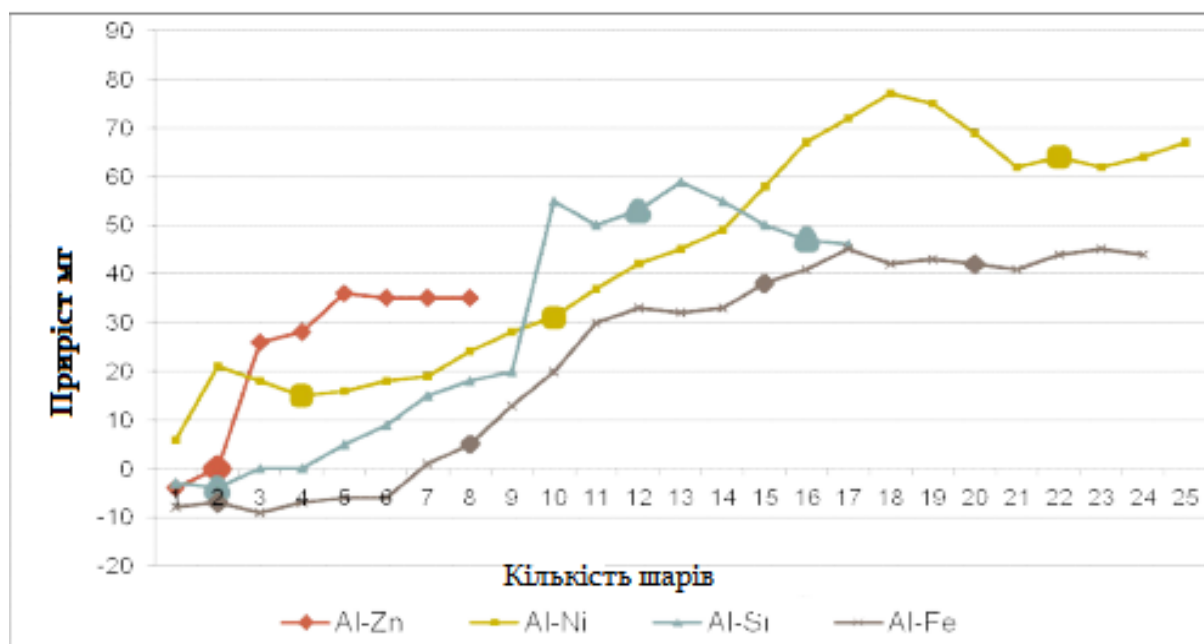
Матеріал, що наноситься на посадочне місце, повинен мати високий модуль пружності і межа міцності в робочому інтервалі температур.

Експерименти показали, що таким матеріалом, що відповідає зазначеним вище вимогам, є покриття, отримане за допомогою електроіскрового легування електродами зі сплаву Al\_Sn. З огляду на високої зносостійкості покриття добре протидіє фреттинг - корозії. З іншого боку, знос посадочних місць під підшипники, як правило, не перевищує  $(0,1...0,3) \cdot 10^{-3}$  м, що дозволяє відновлювати їх методом електроіскрового легування, застосовуючи нескладне мобільне обладнання та відносно просту технологію. При це процес відновлення посадочних місць екологічно чистий, тому що не застосовуються шкідливі речовини і відсутні екологічно брудні відходи. Заміри зношених посадкових місць деталей показали (таб. 3.1.), Що велика їх частина має знос в межах  $(0,1... 0,2) 10^{-3}$  м. Тому необхідна розробка технології для отримання покриття товщиною  $(0,2...0,3) 10^{-3}$  м на сторону, щоб забезпечити наступну механічну обробку. Для стандартно застосовуваної технології електроіскрового легування отримання

покриттів такої товщини на алюмінієвих сплавах важко [8,25].

В результаті проведення дослідження було встановлено, що для отримання покриття підвищеної товщини необхідно використання технології «бар'єрних» шарів [16]. Сутність технології полягає в наступному: після нанесення 3...4 шарів сплаву Al-Sn, коли приріст шару припиняється, наноситься так званий «бар'єрний» шар, який ізолює нанесене покриття зі сплаву Al-Sn від наступного шару такого ж складу і дозволяє продовжувати нарощувати товщину покриття. «Бар'єрний» шар наноситься зі сплаву алюмінію і будь-якого іншого металу, що утворює з алюмінієм тверді сплави (мідь, цинк, нікель і т.д.). Після цього на поверхню алюмінієвих деталей можна наносити ще кілька шарів покриттів електродом зі сплаву Al-Sn. Дослідження показали (рис. 3.1), що найбільш ефективним «бар'єрним» шаром є шар отриманий за допомогою обробного електрода зі сплаву Al-Ni (10% Ni, інше Al). Малоприсадним для отримання «бар'єрного» шару є сплав Al + 10% Zn, а сплави Al-Cu, Al-Si зайняли проміжне становище.

У зв'язку з високою шорсткістю покриттів для забезпечення розміру і чистоти посадкового місця, покриття наносилося з урахуванням



**Рис. 3.1.** Залежність приросту зразків від нанесення «бар'єрних» шарів електродами Al-Zn, Al-Ni, Al-Si, Al-Fe.

Подальша механічна обробка шляхом розточування на токарному верстаті забезпечувала отримання необхідного посадкового розміру і чистоти поверхні (Таб.3.1.).

Таким чином, технологія відновлення посадочних місць під підшипники в алюмінієвих деталях за допомогою електроіскрового легування полягає в наступному:

- очищення посадочних місць від забруднень;
- завмер діаметра отвору за допомогою індикаторного нутромера і визначення необхідної товщини покриття;
- нанесення покриття методом електроіскрового легування за допомогою технології «бар'єрних» шарів;
- механічна обробка отвору (розточування або розкочування).



**Рис 3.2.** Деталі, відновлені за допомогою електроіскрового легування.

В умовах тертя, як зі змазкою, так і без, на поверхні покриттів, отриманих на алюмінієвому сплаві Д1 за допомогою електроіскрового легування електродами зі сплаву AlSn, зносостійкість в кілька разів перевищує зносостійкість загартованої сталі. Встановлено, що спостережуваний ефект забезпечується наявністю в покритті оксидів олова у вигляді мікро- і нанониток [4,35]. В умовах електроіскрового легування при механізованому нанесенні досліджена залежність шорсткості одержуваної поверхні від швидкості руху обробного електрода. Зі збільшенням швидкості руху обробного електрода щодо оброблюваної поверхні, шорсткість отриманого покриття знижується, а зносостійкість зростає.

Запропановано технологію відновлення посадочних місць під підшипники в деталях з алюмінієвих сплавів за допомогою електроіскрового легування.

Для збільшення товщини покриття використана технологія «бар'єрних» шарів, що включає нанесення декількох шарів електродами зі сплаву Al-Sn, з проміжним нанесенням шарів електродами зі сплаву Al-Ni.

### **3.2. Технологія ремонту алюмінієвих деталей.**

Для досягнення високих показників теплопровідності, а також малих розмірів і маси теплообмінників, в їх конструкції використовуються трубки з легких і високо теплопровідних металів і сплавів на основі алюмінію і міді, причому все більше поширення набувають радіатори з алюмінієвих сплавів.

Тонкостінні трубки в процесі експлуатації піддаються істотним термічним (через розширення і стиснення металу при нагріванні і охолодженні) і механічним (вібраційним) навантаженням. Крім того, на їх міцність і надійність впливають корозійні процеси, що неминуче виникають в будь-якій системі, по якій циркулює гаряча рідина.

Важливість своєчасного обслуговування і своєчасного ремонту радіатора пояснюється тим, що порушення герметичності системи охолодження двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) призводить до виходу його з ладу внаслідок перегріву [4,5,36]. Найбільш типові дефекти радіаторів і теплообмінників

пов'язані з втратою герметичності трубок, що призводить до витоків робочого тіла.

Прикладами пошкодження теплообмінників можуть бути:

- тріщини, пробоїни або корозія трубок;
- пошкодження або руйнування ущільнювачів;
- розгерметизація з'єднань в місцях стиків трубок з бачками.

Існують наступні методи ремонту радіаторів:

- введення в охолоджуючу рідину спеціальних складів, герметизуючих тріщину;
- глушіння дефектних трубок різними способами;
- герметизація трубок за допомогою складів на основі епоксидних смол і анаеробних герметиків;
- пайка дефектних трубок легкоплавкими і тугоплавкими припоями.

Усунення пошкоджень і відновлення герметичності алюмінієвих трубок мають такі проблеми:

- погана зварюваність і паяємость, так як на поверхні трубок присутня тугоплавка плівка  $Al_2O_3$ , що перешкоджає надійному з'єднанню зварюються або спаюється металів;
- високу теплопровідність сплавів алюмінію, що перешкоджає зварюванню і пайку, так як вимагає підведення великої кількості тепла;
- високий коефіцієнт лінійного розширення, що веде до викривлення деталей
- мала товщина стінок трубок ( $\sim 0,4 \cdot 10^{-3}$  м), що часто призводить до прогару.
- низька температура плавлення.

Стандартна технологія ремонту радіатора шляхом пайки містить наступні операції:

- очищення і візуальний огляд пошкоджень;
- дефектація за допомогою випробування стисненим повітрям або водою під тиском;
- усунення дефекту за допомогою пайки легкоплавким або тугоплавким

припоєм з застосуванням фтористих і хлористих флюсів; - випробування радіатора під тиском.

Найнадійнішим способом відновлення працездатності радіаторів є пайка легкоплавкими і тугоплавкими припоями. Якщо при пайці латунних радіаторів особливих проблем не виникає (застосовується аргонно-дугова пайка або газополум'яна пайка), то при пайку алюмінієвих радіаторів виникають перераховані проблеми через особливих фізичних і хімічних властивостей алюмінієвих сплавів. Низька температура плавлення ( $660^{\circ}\text{C}$ ) і висока теплопровідність у поєднанні з тонкими стінками ( $\Delta = 0,4 \cdot 10^{-3}\text{м}$ ) радіаторних трубок не дають можливості застосувати аргонно-дугове пайку. А наявність на поверхні трубок плівки окислів  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з високою температурою плавлення ( $2500^{\circ}\text{C}$ ) перешкоджає нанесенню припою, тому що припій ПОС40 на окислену алюмінієву поверхню не лягає. Для попереднього видалення з поверхні дефектного місця трубки плівки окислів застосовується складна технологія: знежирення, травлення, декапирування в різних екологічно шкідливих складах. При цьому необхідно застосовувати флюси, що складаються з хлористих і фтористих солей, які можуть викликати корозію паяних з'єднань, тому потрібна ретельна промивка і нейтралізація сольових розчинів залишилися на поверхні паяних виробів. У зв'язку з цим ця технологія є екологічно шкідливою.

З огляду на недоліки існуючих технологій, розроблена нова бесфлюсова технологія пайки радіаторів [4,7,38].

Для цього місце дефекту очищається від бруду і за допомогою електроіскрового легування поверхню модифікується електродом з сплаву  $\text{Al-Sn}$  з подальшим нанесенням за допомогою електроіскрового легування легкоплавкого припою ПОС-40. Процес електроіскрового легування дозволяє зруйнувати окисну плівку на поверхні трубок і полегшити подальше лудіння поверхні легкоплавким припоєм ПОС-40. Після лудіння дефектне місце паяється стандартним способом і труднощів не становить.





**Рис. 3.3.** Стенд для випробування автотракторних радіаторів.



**Рис. 3.4.** Радіатор із дефектними трубками.

При глушенні всіх отворів радіатора за допомогою спеціальних пробок до патрубків, що йде в розширювальний бачок, шланг приєднувався від компресора. Тиск стисненого повітря регулювався повітряним редуктором від 0,03 до 0,15

МПа.

Застосування попереднього нанесення підшару електродами зі сплаву Al-Sn і припою ПОС-40 на дефектну поверхню за допомогою електроіскрового легування дозволить знизити кількість підготовчих операцій і підвищити надійність паяних з'єднань при одночасному скороченні витрат на ремонт радіаторів з алюмінієвими трубками.

Відпрацювання технології спочатку проводилось на алюмінієвих трубках дефектного радіатора. На трубках робилися надрізи і свердління, що імітують дефекти (рис.3.5)

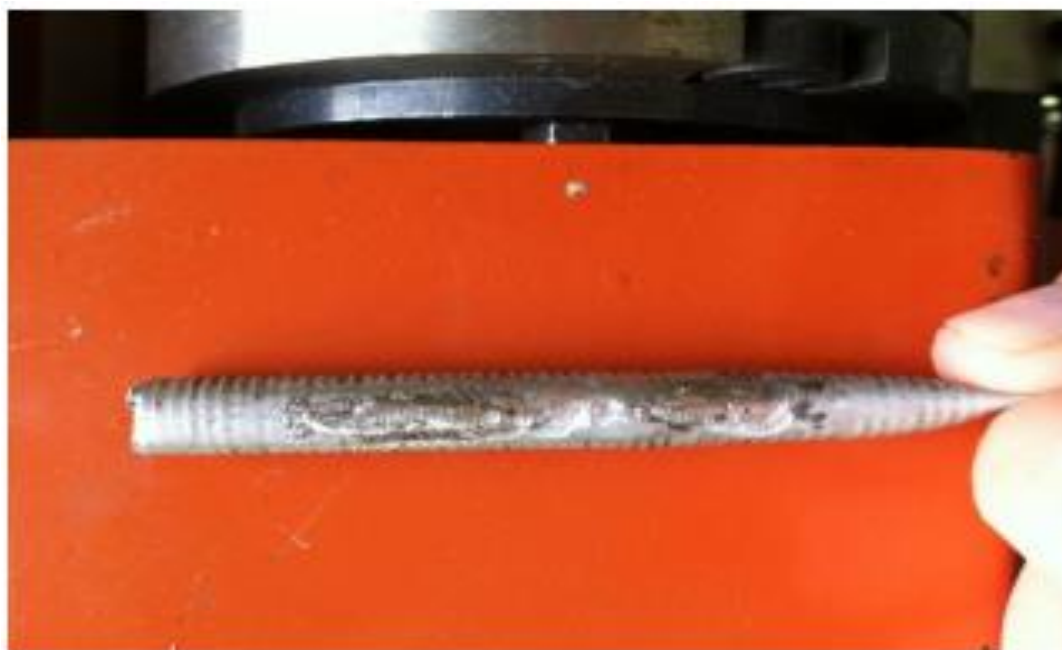


**Рис.3.5.** Трубка для запаювання з штучно зробленими ушкодженнями.

Після цього на дефектних місцях за допомогою електроіскрового легування електродами зі сплаву Al-Sn наносилось покриття, яке руйнувало окисну плівку з  $Al_2O_3$  на поверхні трубки і сприяло підготовці поверхні під пайку припоєм з олов'яно - свинцевого сплаву ПОС40. Пайка велася звичайним паяльником потужністю 40ч60 Вт без застосування флюсу. Процес пайки полягав в тому, що покриття розрівнюють по поверхні трубки таким чином, щоб навколо отворів виходив шар припою не менше  $10 \cdot 10^{-3}$  м шириною. Шар такої ширини необхідний, щоб збільшити площу зчеплення припою з трубкою радіатора і підвищити надійність і герметичність паяного шару [4,5,36].

Випробування трубок на стенді при стандартних умовах (тиск 0,125МПа з витримкою 10 хв) показали, що всі трубки в кількості 5 шт. Випробування витримали успішно (рис. 3.6). При переході безпосередньо до радіаторів технологія була збережена.

Наступні випробування на стенді відремонтованих радіаторів показали надійність технології - течії були відсутні.



**Рис. 3.6.** Трубка радіатора пройшла обробку електроіскровим легуванням і пайку припоєм ПОС40.

Запропановано технологію ремонту трубчастих серцевин алюмінієвих радіаторів автомобільних і тракторних двигунів за допомогою комбінованої обробки електроіскровим легуванням і паяння. Сутність технології полягає в підготовці поверхні алюмінієвої деталі під пайку шляхом нанесення покриття методом електроіскрового легування зі сплаву Al-Sn.

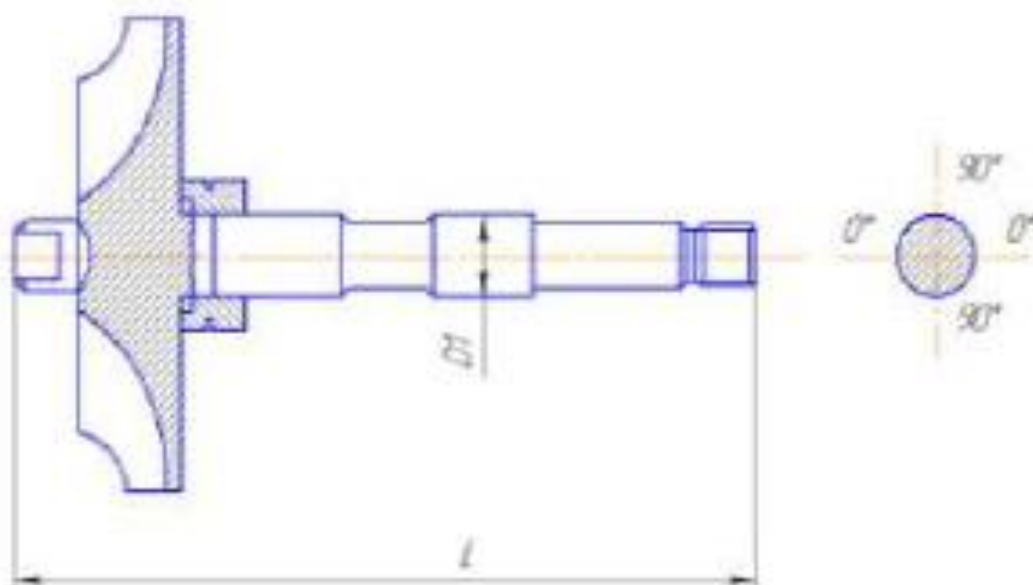
### **3.3. Технологія відновлення валу електроіскровим легуванням.**

Запропанована реставрування методом електроіскрової обробки з використанням наноструктурованого електрода, Р6М5 методом електроерозійного диспергування в кисневмісній робочій рідині ( таблиця 3.2). Така технологія дозволяє збільшити ресурс відновлених деталей в 1,5 рази в

порівнянні з новими [7,23,38].



**Рис. 3.7.** Турбокомпресор: 1 корпус компресора, 2 середній корпус, 3 – корпус турбіни.

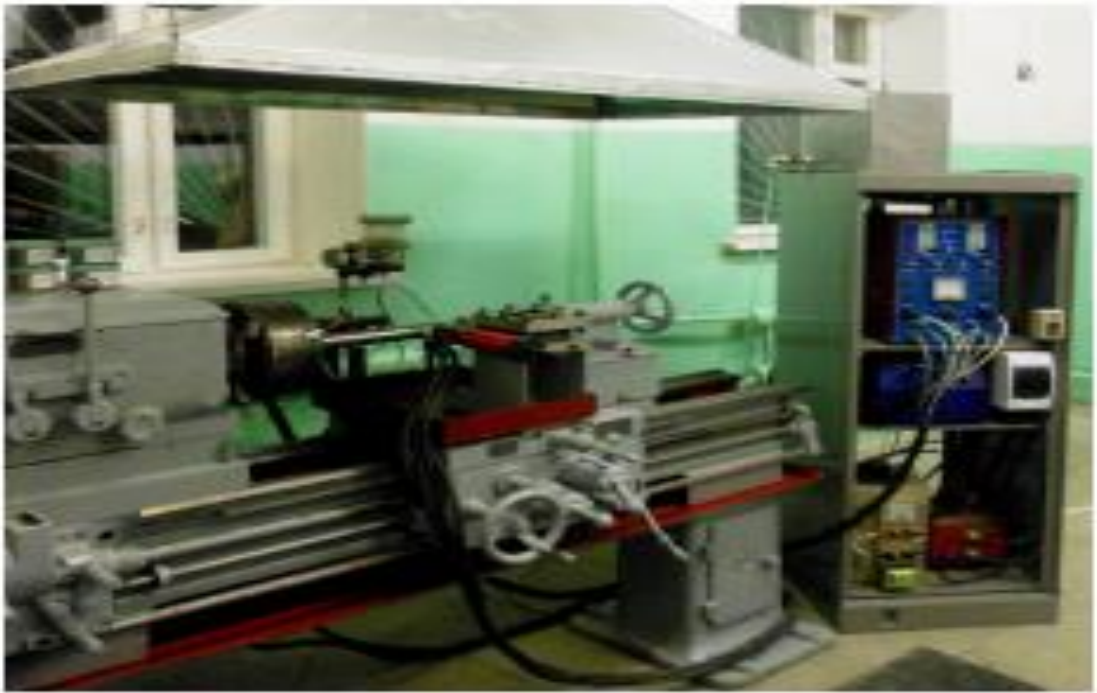


**Рис. 3.8.** Вал ротора турбокомпресора.

Таблиця 3.2. **Технологічний процес відновлення валу ротора турбокомпресора електроіскровою обробкою.**

№	Найменування операції
	<p>Мийна</p> <p>Вимити вал ротора ТКР в миючому засобі «HELIT» з концентрацією 25 г / л при температурі 80 ... 90 ° С для очищення їх від нагару і смоляних відкладень.</p>
010	<p>Дефектовочна</p> <p>Перевірити вал ротора на вигин (при значенні биття більш допустимого технічними вимогами на ремонт деталь підлягає заміні ).</p> <p>1.Визначити знос канавок для кілець ущільнення .</p> <p>2.Визначити знос опорних поверхонь вала ротора під підшипник .</p>
015	<p>Електроіскрова</p> <p>1. Закріпити в трьохкулачковий патрон токарно-гвинторізного верстата 1К62 зворотний центр.</p> <p>2. Закріпити вал ротора ТКР в центрах верстата.</p> <p>3. Опрацювати опорні поверхні вала ротора турбокомпресора під підшипник.</p> <p>4. Обробити поверхню на валі ротора під ущільнювальну втулку, електрод - Ø2 мм, режим установки - 5, <math>n_d = 30</math> об / хв, <math>S_{нд} = 0,23</math> мм / об.</p>
020	<p>Поверхнево-пластична</p> <p>Обкатати опорні поверхні вала ротора під підшипник <math>n_d = 30</math> об / хв, <math>S_{нд} = 0,11</math> мм / об.</p>
025	<p>Притиральні</p> <p>Притерти опорні поверхні вала ротора під підшипник до номінального розміру.</p>
030	<p>Балансувальна</p> <p>Провести балансування вала ротора ТКР з турбінним колесом в двох площинах по досягненню величини, зазначеної в специфікації на капітальний</p>
035	<p>Очищення</p> <p>Промити блок в розчині миючого засобу</p>
040	<p>Контрольна</p> <p>Провести технічний контроль відновленого вала</p>





**Рис. 3.9.** Токарний верстат з інтегрованою в нього установкою для електроіскрової обробки.

**Таблиця 3.3. Параметри електроіскрового легування поверхні вала**

№	Параметри	Нанесення ЕІ покриття
1	Частота обертання деталі, хв <sup>-1</sup>	50
2	Подача електрода, мм/хв	0,04...0,05
3	Діаметр деталі, мм	12
4	Шорсткість поверхні, Ra мкм	0,8... 1,6
5	Час налаштування, хв	20,0
6	Час обробки (одна опора)хв	10

Таблиця 3.4. Трибологічні характеристики досліджуваних покриттів

	Коефіцієнт тертя ( $\mu$ )					Фактор зносу статистичного партнера, $\text{мм}^2 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}$	Фактор зносу зразка $\text{мм}^2 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}$
	початковий	мінімальний	максимальний	Середнє значення	Середнє відхилення		
Сталь 30ХГСА (контргіло Stainless Steel L I S I 420)							
100 м	0,145	0,143	0,633	0,426	0,061	$3,671 \cdot 10^{-6}$	$1,978 \cdot 10^{-7}$
200 м	0,184	0,176	0,611	0,457	0,046	$2,150 \cdot 10^{-7}$	$1,168 \cdot 10^{-6}$
500 м	0,207	0,191	0,629	0,486	0,034	$2,620 \cdot 10^{-7}$	$5,340 \cdot 10^{-7}$
ПБРС							
ПБРС (контргіло 100Cr6)	0,345	0,220	0,481	0,374	0,081	$2,643 \cdot 10^{-5}$	0
ПБРС (контргіло Stainless Steel AISI 420)							
100 м	0,173	0,156	0,194	0,179	0,010	$3,788 \cdot 10^{-11}$	0
200 м	0,199	0,162	0,221	0,197	0,017	$3,240 \cdot 10^{-7}$	0
500 м	0,162	0,118	0,162	0,146	0,008	$1,595 \cdot 10^{-7}$	0



Рис. 3.10. Токарський верстат зі інтегрованої в нього установкою для електроіскровою обробки 1-ALIER 31.



**Рис. 3.11.** Вигладжування поверхні вала після електроіскрової обробки.

Вміст нанорозмірних частинок в електродному матеріалі сприяє поліпшенню фізико-механічних властивостей електроіскрових покриттів. Зокрема, середнє значення мікротвердості електроіскрового покриття (4,36 HV), збільшується (2,09 HV) в 2,1 рази.

На думку фахівців, при електроіскровом зміцненні в поверхневому шарі, наприклад, сталі відбуваються процеси, приведені в табл. 3.5.

**Таблиця 3.5. Процеси, які відбуваються при зміцненні.**

Зміцнюваний матеріал	Процес	
	<i>Вид</i>	<i>Особливості</i>
Вуглецева сталь, що містить вуглець в кількості понад 0,6 %, а також легуючі елементи у великій кількості	Надшвидкісне гартування	Короткочасний нагрів до високої температури і миттєве охолодження нагрітих і розплавлених ділянок масою холодного металу.
Інструментальна сталь	Азотизація	Дисоціація атмосферного азоту в розряді з утворенням атомарного азоту. З'єднання азоту з елементами поверхневого шару і утворення нітрідів металів (титана, хрому, заліза і ін.)



При електроіскровом зміцненні мікротвердість білого шару у вуглецевих сталях може бути доведений до 230 МПа, висота мікронерівностей до 2,5 мкм. Товщина шаруючи покриття, одержуваного на деяких установках, складає 0,003-0,2 мм.

### 3.4.Відновлення блоку і головки блоку циліндрів дизельних двигунів.

Даний метод забезпечує можливість відновлення деталей з одностороннім зносом до 100-120 мкм (умови тертя ковзання) і до 600-700 мкм (в нерухомих з'єднаннях).



а)



б)

**Рис. 3.12.** Дефекти на площині роз'єму головки (а) і блоку (б) циліндрів дизельного двигуна DXi 11 вантажного автомобіля «ВОЛЬВО».

Таблиця 3.6. Електричні режими установки ENPO при відновленні площині роз'єму головки і блоку циліндрів.

Найменування параметра	Значення параметра при обробці	
	нихромом	міддю
Умовний номер електричного режиму	10	30
Енергія імпульсів, Дж	0,09	2,52
Тривалість імпульсів, мс	40	700
Частота імпульсів, Гц	1500	120
Амплітудний струм, А	125	200



а)



б)

**Рис. 3.13.** Відновлена поверхня роз'єму головки блоку: а - після ЕІЛ; б - після локальної ручної механічної обробки.

Діаметральний знос гільз циліндрів дизельних двигунів до періоду капітального ремонту не перевищує 150-200 мкм [1,31,32]. У разі зносу гільз блок знімають з машини і піддають розбиранні, зношені гільзи зазвичай відправляють в утиль. Однак досвід показує, що гільзи циліндрів, навіть якщо вони з'ємні, доцільно відновлювати методом ЕІЛ без демонтажу з блоку. Це стосується задирів дзеркала і кільцевого вироблення в його верхній частині. Таким прикладом на рис. 3.11-3.14 наведені фотографії, що стосуються відновлення гільз циліндрів блоку САТ-3116. Технологічні прийоми аналогічні відновленню дефекту блоку, наведеним вище. Відмінність полягає у використуваному електродному матеріалі: замість електрода Х20 Н80 для заповнення дефекту використовували електрод з бронзи БрКМц 3-1. Цей матеріал добре себе зарекомендував при відновленні пар тертя, отриманий микрорельєф сприяє створенню масляних кишень, забезпечує більш сприятливі умови мастила для роботи пари «гільза - поршневе кільце». Бронзове покриття дозволяє реалізувати



беззадірну роботу пари тертя, що особливо цінно в умовах запуску двигуна в зимовий період [1,9,31].



**Рис. 3.14.** Зношені гільзи циліндрів двигуна.



**Рис. 3.15.** Гільзи циліндрів двигуна після відновлення методом ЕІЛ (без механічної обробки).





**Рис. 3.16.** Відновлені гільзи циліндрів двигуна CAT3116 (після механічної обробки).



**Рис. 3.17.** Усунення в гільзі циліндра двигуна 6 дефекту у вигляді глибокої подряпини відновлення процесів методом ЕІЛ (після мехобробки).

Технологія відновлення гільз передбачає після ЕІЛ виконання операції хонінгування в номінальний розмір. При електроіскровому способі відновлення зношених деталей вдається не тільки відновити їх геометричні розміри, а й змінити фізико-механічні властивості поверхонь, покращуючи їх триботехнічні

характеристики. Технологічний маршрут відновлення гільз містить всього дві операції: нанесення покриття і його хонінгування з видаленням мінімального припуску на невеликій ділянці робочої поверхні [1,2,32].

Однією з відповідальних деталей коробки передач автомобіля є вилка перемикачів. Характерним її дефектом, що з'являється в результаті тривалої експлуатації, є знос ділянки торцевої поверхні (рис. 3.15), що знаходиться в контакті з перемикаємою деталлю. Знос вилки на величину більше 1 мм призводить до включення відразу 2-х передач, що неминуче тягне до виходу з ладу всієї КПП. На практиці ця чавунна деталь є невідновлюваною. За даними офіційного дилера німецької фірми вартість вилки становить близько 100 євро, до капітального ремонту 20-25% вилок мають неприпустимий знос. Доставка цієї деталі від фірми-виробника здійснюється під замовлення з Німеччини, сполучення з втратою часу і грошей. На рис.3.15 показано зношену ділянку вилки з частковим усуненням дефекту методом ЕІЛ. Це досягнуто завдяки тому, що даний метод нанесення покриттів реалізується без значного розігріву тонкостінної ділянки деталі. І такі деталі якісно відновлюються в номінальний розмір з ресурсом не нижче ресурсу нової деталі. В даному випадку матеріалом електрода служила пластина, вирізана з аналогічної вилки перемикачів передач КПП.



**Рис. 3.18.** Відновлена ділянка чавунної вилки.

Повне усунення дефекту в зв'язку з невеликою площею зносу складає менше години, вартість відновлення - близько 10% від вартості нової деталі.

У практичній діяльності добре зарекомендували себе при виконанні зазначених і подібних робіт установки типу ENPO. (рис. 3.16), характеристики яких наведені в табл. 3.7. Режим роботи: ручний і механізований. Можуть працювати в механізованому режимі при додатковому комплектуванні механічними пристроями. Їх відрізняє широкий діапазон електричних режимів, що є основою високої універсальності, а також економічності та мобільності [1,2,31].



**Рис. 3.19.** Установка для электроискровой обработки ENPO.



Таблиця 3.7. Технічні характеристики установок типу ENPO.

	ENPO -1	ENPO -2	ENPO -3
Комплектність:	генератор; вібробудник		
Напруга живлення ( $\pm 10\%$ ) при частоті 50 Гц:	220 В		
Споживана потужність, кВА	0,25	0,5	0,5
Кількість електричних режимів	35	35	70
Максимальна енергія імпульсів, Дж	3,15	5	10
Частота імпульсів, Гц	10-3200	12-3000	5-1600
Частота вібрації електрода:	600 Гц		
Товщина покриття (мм) при контактній суцільності 15-30%: твердим сплавом Т15К6 / сталлю ШХ15 / бронзою БрК МцЗ-1	0,01-0,20/0,01-1,3/ 0,01-1,4	0,01-0,4/0,01-2,2/ 0,03-2,3	0,01-0,5/0,01-0,87/ 0,05-2,7
Висота мікронерівностей Ra (мкм) твердим сплавом Т15К6	2,5-20	2,5-50	2,0-60
Максимальна продуктивність нанесення покриття без пропусків, см <sup>2</sup> / хв	6	10	12
Габаритні розміри генератора, см	130x300x210	170x430x 250	160x320x360
Маса генератора, кг	7	14	14
Режим роботи:	ручний і механізований. Можуть працювати в механізованому режимі при додатковому комплектуванні механічними пристроями.		

Взаємодія контактуючих деталей у вузлах і агрегатах різної техніки при її експлуатації пов'язано з протіканням деформаційних, теплових і хімічних процесів. В результаті відбуваються знос деталей, порушення геометричної форми робочих поверхонь і погіршення умов роботи на контакті в сполученнях. Знос деталей і втрата необхідних властивостей міцності їх поверхневих шарів є причиною обмеження ресурсу машини, і для подальшої її експлуатації потрібен ремонт зношених агрегатів. Витрати на ремонт і обслуговування техніки значні і порівняти з їх початковою вартістю, особливо якщо мова йде про ремонт імпоротної техніки і запчастин, придбаних за кордоном. Він сприяє значній економії матеріальних, енергетичних і трудових ресурсів, знижує екологічне навантаження на навколишнє середовище.

При 100-відсотковому ресурсі відновлених деталей їх вартість зазвичай не перевищує 30% від ціни нової деталі. Відновлення деталей сприяє суттєвій економії коштів при ремонті машини, економії часу на придбання нових деталей.



### 3.5. Дослідження абразивних можливостей покриттів, отриманих за допомогою електроіскрового легування на алюмінієвому сплаві Д1.

Одним з методів використання покриття, отриманого на алюмінієвих деталях методом електроіскрового легування, є виготовлення та відновлення абразивного інструменту для шліфування сталевих деталей, а також для заточування та доведення різального інструменту. Як інструмент для шліфування були виготовлені кола зі сплаву Д1, подібні до алмазних, (рис 3.20) і на торці яких вручну наносилося покриття електродами зі сплаву Al-Sn в один шар.



**Рис 3.20.** Диски із сплаву Д1 із нанесеним покриттям.

Для випробування шляхом шліфування було обрано сталь 45, загартована до твердості HRC 55 одиниць. Стрижень з цієї сталі встановлювався в патрон токарного верстата з можливістю обертання із заданою швидкістю (рис.3.21). Шліфмашинка забезпечувала обертання кола зі швидкістю 200-11000 об/хв. При випробуваннях використовувалася швидкість 11000 об/хв. Технологія випробування полягала в наступному: стрижень був поділений на чотири частини; перша частина не шліфувалася, тому що на цій частині необхідно було

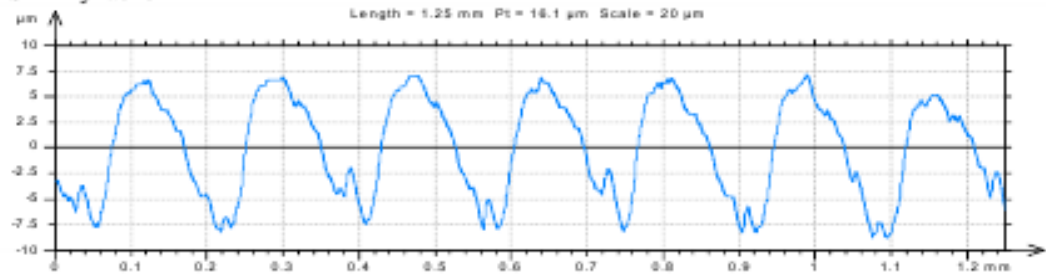
перевіряти вихідну шорсткість після механічної обробки; на другому відрізку стрижня було зроблено один прохід шліфувального кола, на третьому відрізку було зроблено два проходи, на четвертому відрізку-три проходи шліфувального кола.



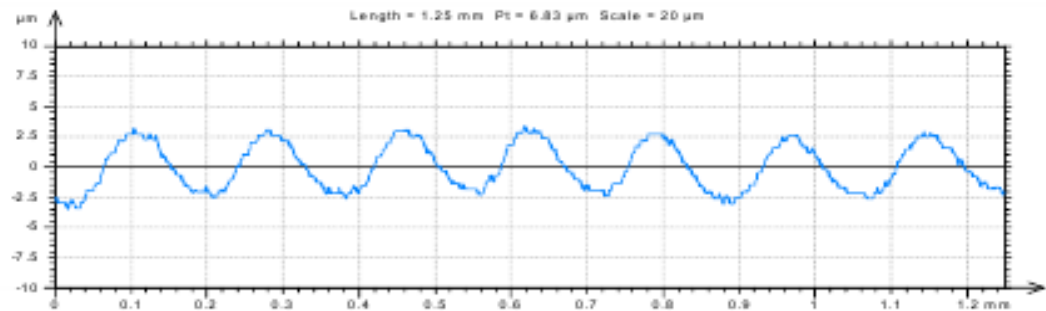
**Рис. 3.21.** Випробування абразивних властивостей покриття під час шліфування сталевого загартованого зразка.

Шліфування проводилося всуху, без застосування мастильно-охолоджувальної рідини. Після шліфування стрижень знімався зі верстата і проводився замір шорсткості  $R_a$  всіх чотирьох поверхонь стрижня за допомогою профілометрапрофілографа Sutronic, Taulor Hobson, GB. Результати вимірів показали наступне: при вихідній шорсткості в середньому  $R_a$  5,6 мкм на всіх шліфованих поверхнях відмічено зниження шорсткості до 1,4-1,6 мкм. (Перший відрізок-без обробки -5.0-5.6 мкм. 0-3.6мкм., Третій відрізок-1,6-1,8 мкм., Четвертий відрізок-1,4-1,6 мкм.) Профілограма виміру шорсткості наведена на рис.3.22.

Валик Sn-Al участок 1



Валик Sn-Al участок 4



Участок 1	Участок 4
Roughness profile	Roughness profile
Rz 12.2 µm	Rz 4.53 µm
Ra 3.33 µm	Ra 1.27 µm
Material Ratio parameters	Material Ratio parameters
Rmr 5.56%	Rmr 21.9%
Rdc 8.09 µm	Rdc 3.04 µm

**Рис.3.21.** Шорсткість зразка до і після випробувань.

Цілком очевидно, що необхідно провести додаткові дослідження з метою визначення необхідних швидкостей шліфування (обертання деталі, переміщення супорта і т. д.), оптимальної товщини шару покриття, що наноситься і т. д. Враховуючи невеликий по товщині шар покриття, в майбутньому слід віддати перевагу не шліфування, при якому необхідно згладжувати грубі ризики, що залишилися від попередньої механічної обробки, а полірування деталей після шліфування, де поверхня деталі має нижчу шорсткість. Крім того, слід дослідити можливість застосування мастильно-охолоджувальної рідини з визначенням її оптимального складу, витрати тощо. Загалом за результатами проведеного експерименту можна сказати, що з наукової точки зору досягнуто позитивного результату, оскільки експеримент довів, що покриття на алюмінієвому сплаві Д1,

отримане нанесенням шару з алюмінієвоолов'яного сплаву за допомогою електроіскрового легування, може шліфувати загартовану сталь.

### **3.6. Застосування електроіскрових покриттів при відновленні вузлів гідروобладнання.**

Практика використання машин з гідравлічним приводом показує, що питома вага відмов гідроприводу сягає 70%. Здебільшого це обумовлено низькою надійністю таких дорогих агрегатів, як гідронасоси (гідромотори) та гідравлічні розподільники.

З проведеного аналізу методів, які застосовуються для відновлення деталей гідроагрегатів, випливає, що електроіскрова обробка є найбільш перспективною. На відміну від технологій, де джерело тепла та робочий матеріал формуються окремо, електрична іскра як технологічний інструмент здійснює руйнування електрода та формування на поверхні деталі покриттів з необхідними властивостями. Для відновлення та підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей агрегатів навісних гідросистем тракторів метод електроіскрової обробки дозволяє реалізовувати різні технологічні схеми, що включають легування, зміцнення та відновлення робочих поверхонь деталей у ручному та механізованому режимах.

**Таблиця 3.8. Характеристики робочих поверхонь типових прецизійних деталей гідравлічних систем**

Тип деталей	Клас чистоти робочої поверхні	Відхилення геометрії
Гільзи	10	Овальність і конусоподібність $\leq 0,005$
Плоскі золотники	10–12	Максимальна ввігнутість 0,004
Корпуси гідроблоків	7	Овальність і конусоподібність $\leq 0,005$
Золотники, плунжери, дроселі	11–12	Нециліндричність $\leq 0,005$



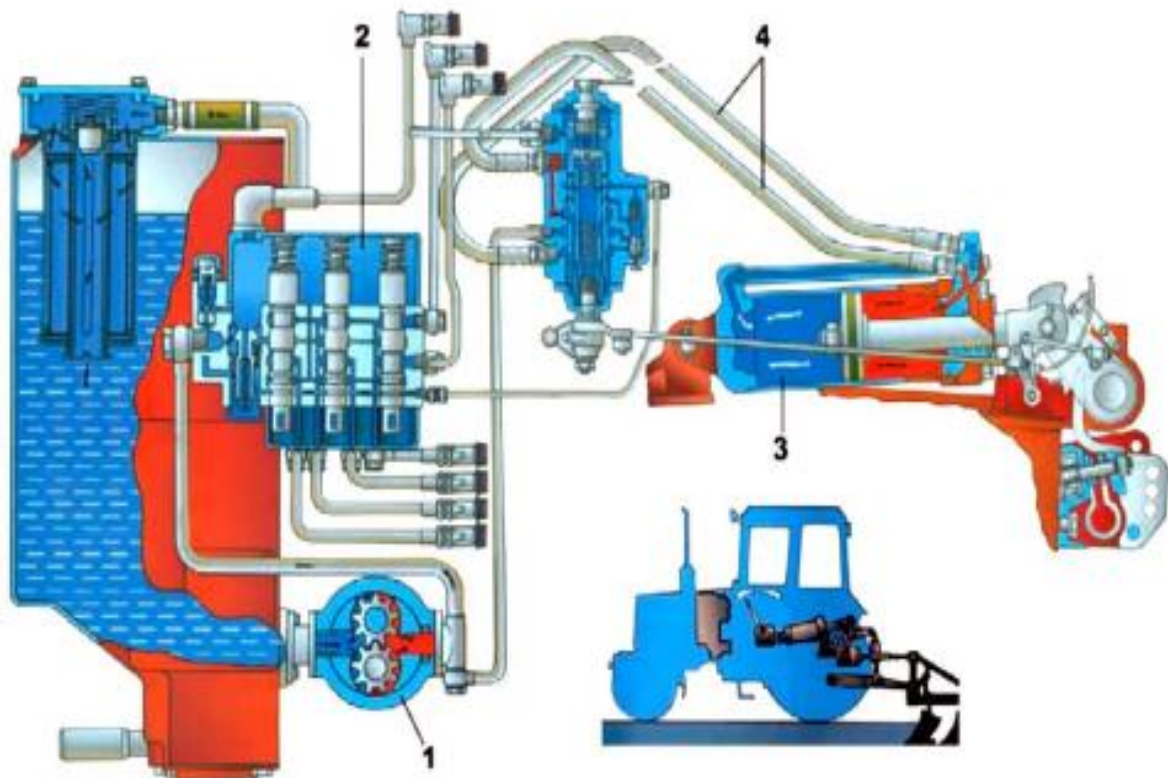


Рис. 3.22 Гідравлічна апаратура сільськогосподарських тракторів: 1 - насос; 2 - гідророзподільник; 3 - силовий гідроциліндр; 4 - гідролінія.

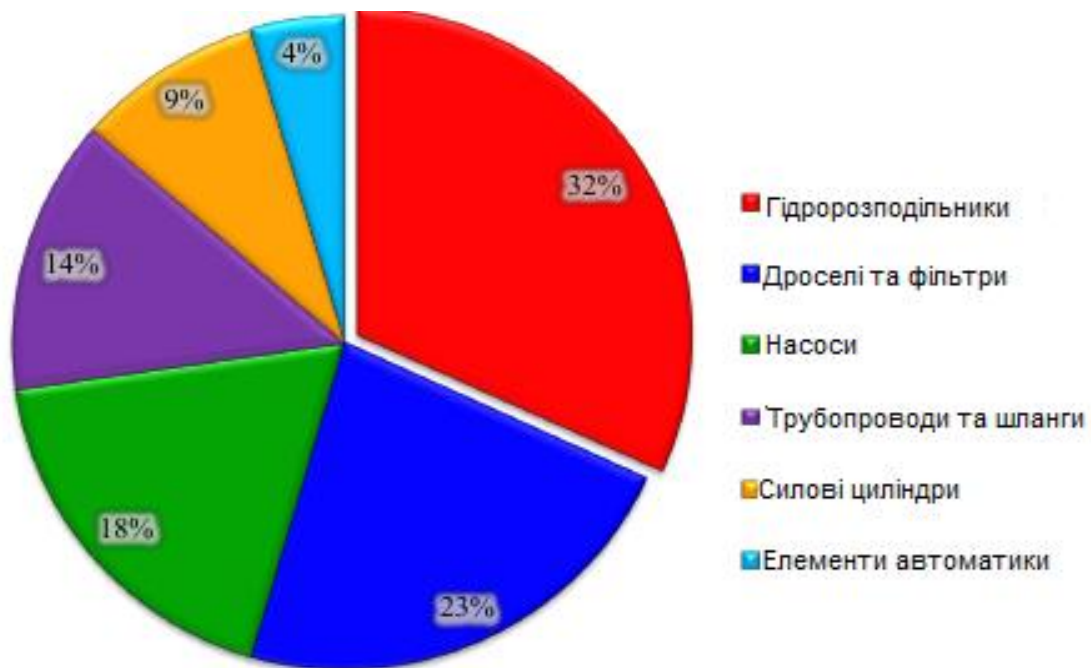


Рис. 3.23 Розподіл несправностей гідравлічних систем сільськогосподарських тракторів.



**Рис.3.24.**Характеристика забруднюючих речовин робочої рідини.

Таблиця 3.9. Мінералогічний склад зразків пилу, взятого в Одеській області

Складова	Вміст, %	Мікротвердість, МПа
Кварц	79	105 00-11 300
Оксид алюміній	11	21 000
Оксид зліва	11	9 000
Оксид магнію	1	9 080-11 250
Оксид кальцію	1	6 045

Аналіз конструкцій та принципу роботи гідроагрегатів дозволив визначити механізм втрати їх працездатності. Встановлено, що у круглих шестеренних насосів зношування деталей сполучення: цапфи шестерень – напівотвори підтискної обойми; торцеві поверхні шестерень – платики; зуби шестерень за зовнішнім діаметром – колодязь підджимної обойми порушує просторову геометрію з'єднань і, як наслідок, веде до зниження об'ємної подачі. У гідравлічних розподільників значення загального витoku визначають

зношування конічної поверхні перепускного клапана і зазори, утворені в результаті зношування внутрішньої поверхні напрямної і пов'язаної з нею зовнішньої поверхні перепускного клапана. Витік через золотникові пари (гідроплотність) визначається зазорами, спричиненими зносами поясів пари «золотник – отвір у корпусі». У поршневих гідроциліндрів коефіцієнт корисної дії визначають знос деталей штокового і поршневого вузлів, а також погнутість штока. З технічної документації на нові гідроагрегати видно, що заводи-виробники досить обґрунтовано вказують критерії параметрів працездатності та значення їхнього граничного стану. Однак при цьому відсутні дані про граничні зношування деталей, що суттєво ускладнює одну з важливих операцій технологічного процесу – дефектацію.



**Рис. 3.25.** Причини відмов гідроциліндрів.

на зношені пояски отвору передньої кришки наносять покриття електродом зі сплаву X20H80 5 мм з використанням генератора «ALIER-54».

Режими обробки: для поверхонь зі зношеннями до 220 мкм – кількість енергії 150 Дж, час обробки 39 с, для поверхонь зі зношеннями до 786 мкм – кількість енергії 500 Дж, час обробки 87 с.

Наступна механічна обробка отвору передньої кришки здійснюється розгортанням на токарно-гвинторізному верстаті машинною циліндричною розгорткою. На відновлену поверхню з використанням генератора «ALIER-31» наносять приробітне електроіскрове покриття електродом з міді 3 мм на 3-му енергетичному режимі, з коефіцієнтом енергії, що дорівнює 1. Час обробки 0,83 см<sup>2</sup>/хв. Для підвищення ефективності впровадження інноваційних технологій на підприємствах АПК розроблено нове та модернізоване наявне технологічне оснащення: комутуючі пристрої для механізованої та ручної електроіскрової обробки; обертач на базі токарно-гвинторізного верстата; пристрій для обробки отворів у корпусах гідророзподільників; приставка до гідростенду для оцінки технічного стану гідроциліндрів; пристосування для фінішної обробки зовнішніх циліндричних поверхонь та ін.



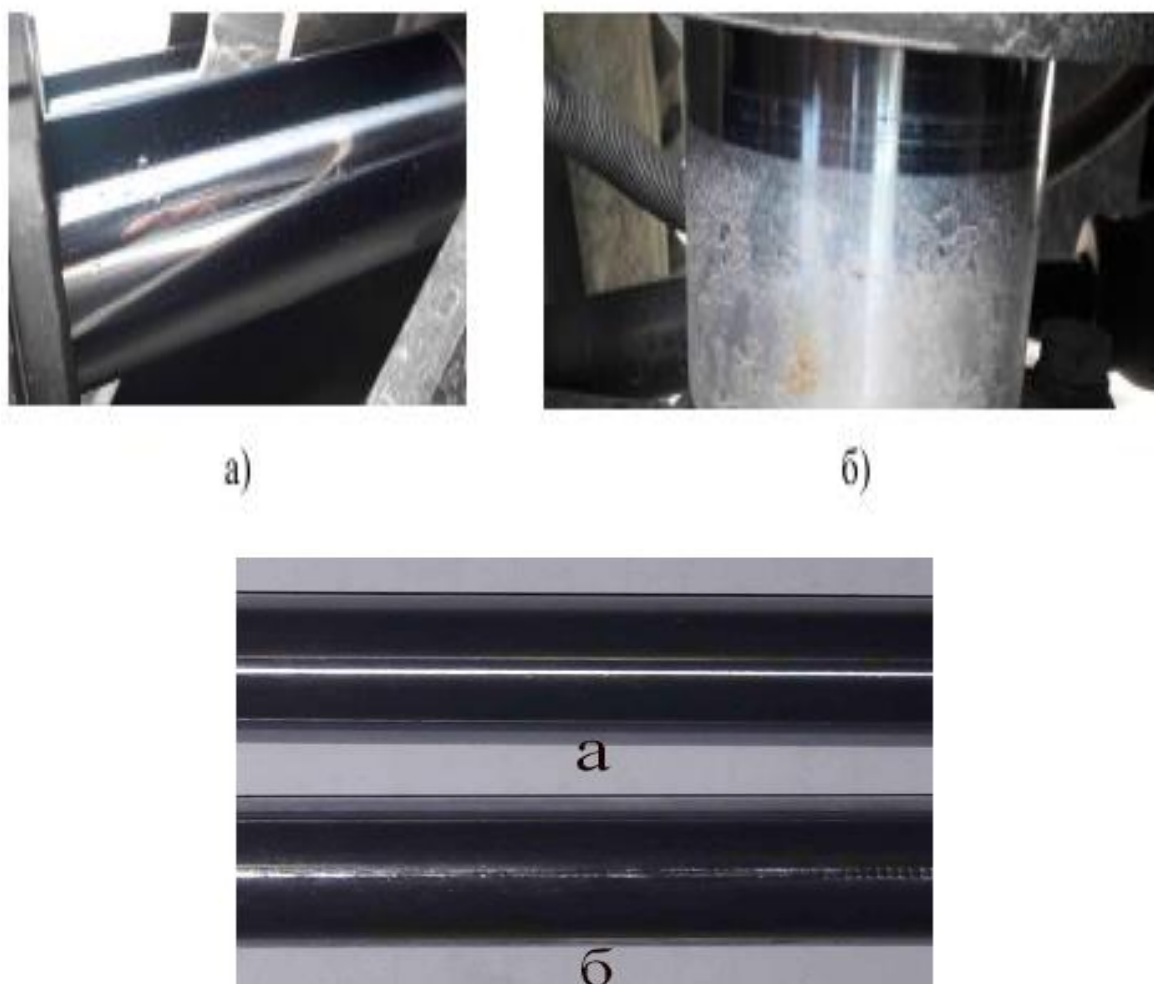
**Рис. 3.26.** Зовнішній вигляд зношених поверхонь деталей гідросистеми.

Істотними перевагами електроіскрового легування стосовно інших методів поверхневого зміцнення є: – висока міцність зчеплення шару, що зміцнює, з основою; легування поверхневого шару катода складовими елементами анода без зміни геометричних розмірів; – можливість локальної обробки поверхні (легування здійснюється лише в тих зонах, де це необхідно, при цьому додатковий захист інших

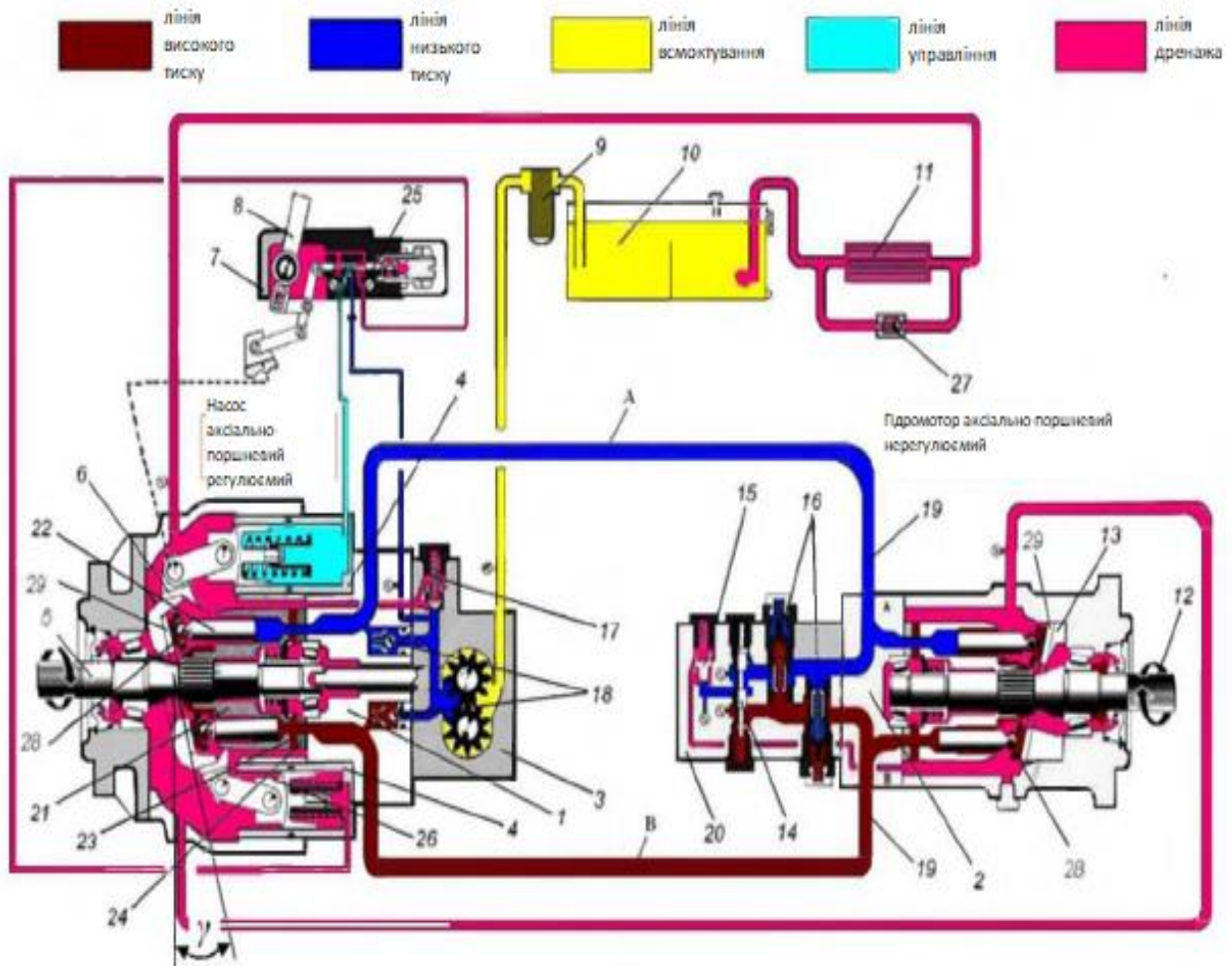


поверхонь деталі не потрібний); – відсутність нагріву оброблюваної деталі; – відсутність вимог до спеціальної попередньої підготовки підкладки; – можливість застосування широкої номенклатури матеріалів для обробки підкладки (чисті метали, сплави, металокерамічні композиції, тугоплавкі сполуки та ін.) [40]. Процес електроіскрового легування простий, а устаткування, необхідне реалізації технології, надійно і малогабаритно [14,47].

Максимального збільшення твердості оброблюваних поверхонь при ЕІЛ можна досягти за рахунок використання електродів, виготовлених з матеріалів, що мають високу твердість (при цьому формовані поверхні можуть мати твердість більш високу, ніж матеріал, що наноситься).



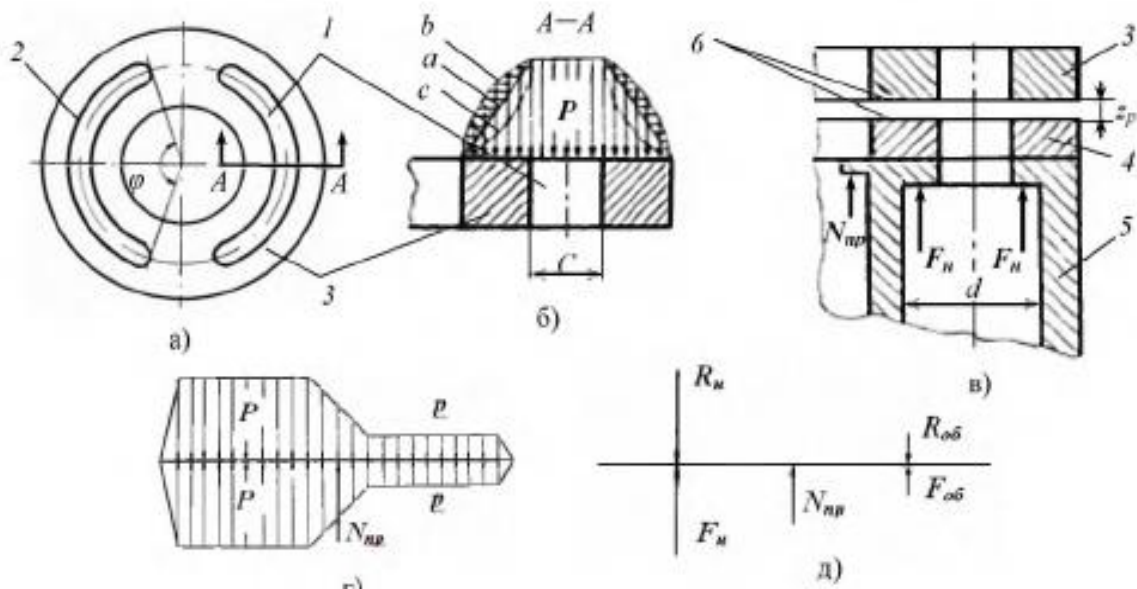
**Рис. 3.27.** Зовнішній вигляд поверхні штока гідроциліндра: а) відновлений; б) серійний.



**Рис. 3.28.** Схема об'ємного гідроприводу: 1 – гідронасос НПА-112; 2 – гідромотор МПА-112; 3 - насос підживлення; 4 – сервоциліндри; 5 – вал насоса; 6 – колиска; 7 – серворозподільник; 8 – важіль управління серворозподільника; 9 – фільтр; 10 - гідробак; 11 – теплообмінник; 12 - вал гідромотора; 13 - упор; 14 – золотник клапанної коробки; 15 - клапан переливний; 16 – клапана високого тиску; 17 - клапан запобіжний насоса підживлення; 18 - клапани зворотні; 19 - лінії нагнітання А та В; 20 – клапанна коробка; 21 - блок циліндрів; 22 - поршні; 23 - розподільник латунний; 24 - розподільник сталевий; 25 – золотник серворозподільника; 26 - поршені сервоциліндра; 27 - клапан запобіжний теплообмінника; 28 - п'ята поршня; 29 – опора.



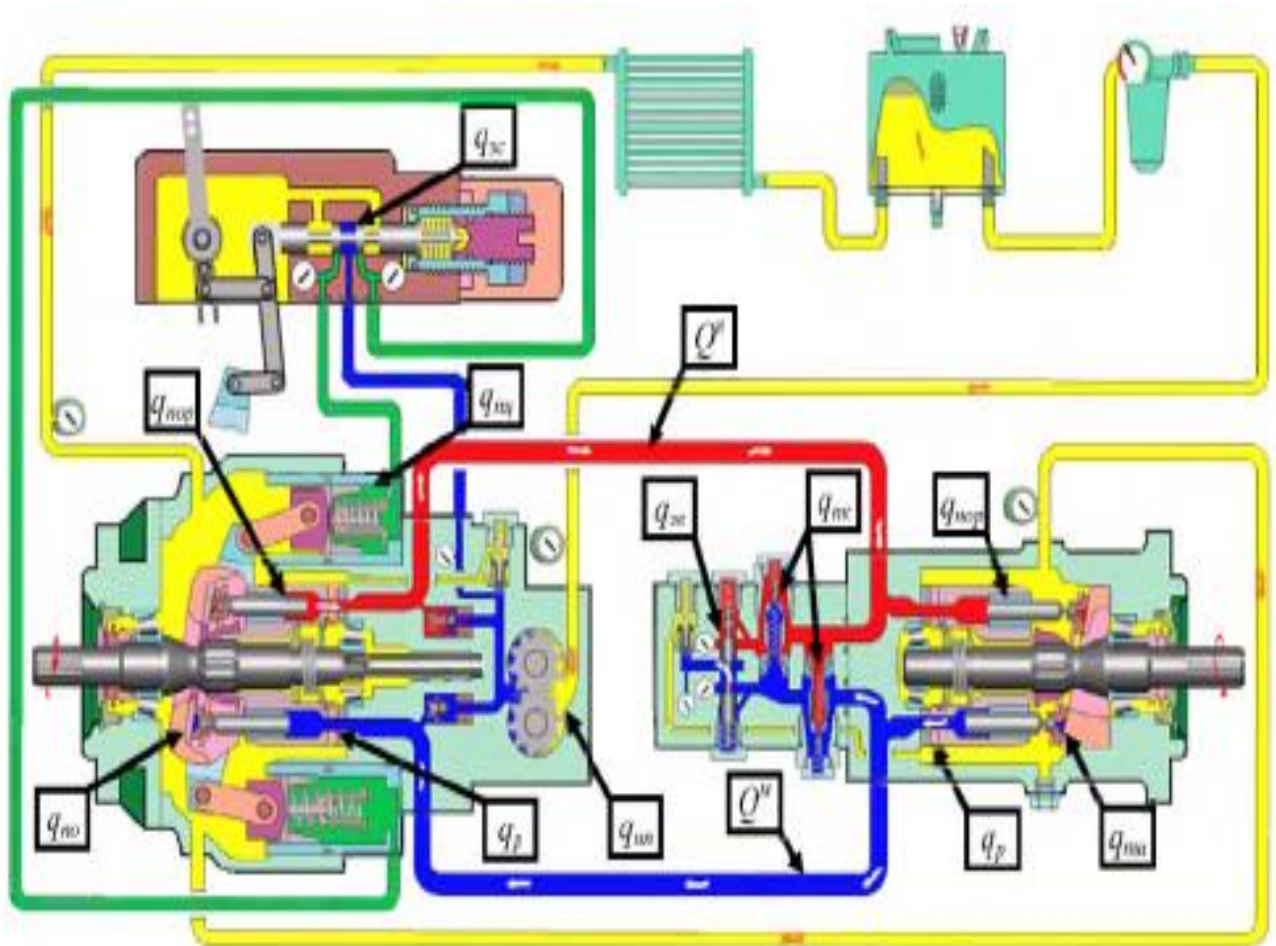
**Рис. 3.29.** Зовнішній вигляд зносу робочих поверхонь а) латунного та б) сталевого розподільників; в) опори; г) п'яти поршні; д) золотника клапанної коробки; е) поршня.



**Рис.3.30.** Схеми, що характеризують дію сил у стиковому зазорі деталей розподільного з'єднання: 1 - вікно, що нагнітає; 2 - всмоктувальне вікно; 3 - розподільник сталевий; 4 - розподільник латунний; 5 - блок циліндрів; 6 - ущільнюючі пояски;  $\varphi$  - кут охоплення серпоподібного вікна;  $d$  - діаметр циліндра, мм;  $C$  - ширина отвору циліндра, мм;  $gr$  - зазор у розподільчому з'єднанні, мм;  $a, b, c$  - криві, що характеризують зміну епюр тиску;  $P$  і  $p$  - тиск рідини в лініях нагнітання, МПа;  $F$  та  $F_{об}$  - результуючі сили тиску рідини, Н;  $I_{пр}$  - зусилля пружини, Н;  $F_n$  і  $R_{об}$  - сили, що віджимають, Н.

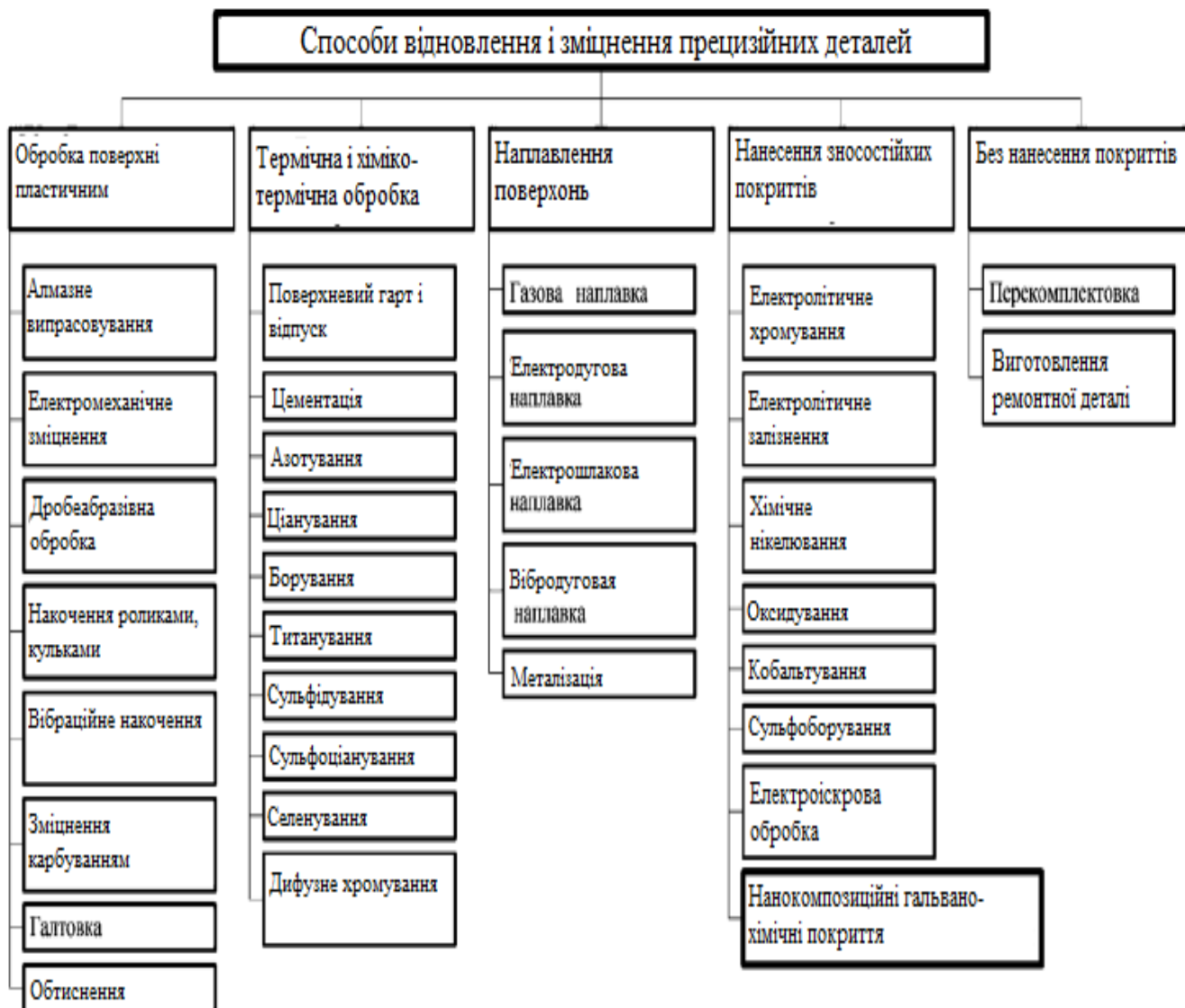
Таблиця 3.10. Методика визначення основних технічних характеристик об'ємного гідроприводу ГСТ.

№	Порядок випробувань	Вимоги до виробу
	Контрольовані параметри	Контрольовані параметри
1	Контроль об'ємної подачі гідронасосу	При частоті обертання валу гідронасоса $n_H = 2000 \pm 50$ об/хв та тиску в лінії нагнітання $P = 27$ МПа, об'ємна подача насоса $Q_{нф}$ не менше 212,8-7,6 л/хв.
2	Контроль частоти обертання гідромотора	При частоті обертання валу гідронасоса $n_H = 2000 \pm 50$ об/хв і тиску лінії нагнітання $P = 27$ МПа, частота обертання вала гідромотора $n_M$ не менше $1950 \pm 50$ об/хв
3	Контроль крутного моменту на валу гідромотора	При частоті обертання валу гідронасоса $n_H = 2000 \pm 50$ об/хв і тиску в лінії нагнітання $P = 27$ МПа, момент $M_{кр}$ , що крутить, на валу гідромотора не менше 404 Н м
4	Контроль тиску підживлення	При максимальній об'ємній подачі насоса, частоті обертання валу насоса $n_H = 1000 \dots 2000$ об/хв і тиску лінії нагнітання $P = 27$ МПа, тиск підживлення $p_p$ не менше 1,2 МПа. При нейтральному положенні важеля управління серворозподільника тиск підживлення $p_p$ не менше 1,5 МПа
5	Контроль максимального тиску	При обертанні вала гідромотора тиск спрацьовування запобіжних клапанів високого тиску $P_{max} = 42 \pm 2$ МПа
6	Контроль тиску на зливі	При $P = 27$ МПа та $n_H = 1000 \dots 2000$ об/хв тиск на зливі $p_d = 0,25$ МПа
	Розрахункові параметри	Розрахункові параметри
7	Контроль об'ємного ККД окремих агрегатів	При $P = 27$ МПа та $n_H = n_M = 2000 \pm 50$ об/хв, $\Pi_{но} = \Pi_{мо}$ не менше 0,95
8	Контроль об'ємного ККД гідроприводу загалом	При $P = 27$ МПа та $n_H = 2000 \pm 50$ об/хв це не менше 0,9



**Рис. 3.31.** Шляхи витоків рідини : фактична подача гідронасосу;  $Q'$  - фактична витрата гідромотора;  $q_p$  - витіку в з'єднанні «латунний - сталевий розподільник» гідронасосу та гідромотора;  $q_{пор}$  - витік у з'єднанні «поршень - отвір втулки блоку циліндрів» гідронасосу та гідромотора;  $q_{п\sigma}$  - витік у поєднанні «п'ята - опора колиски»;  $q_{ш\sigma}$  - витік у поєднанні «п'ята - похила шайба»;  $q_{з\sigma}$  - витік у з'єднанні «золотник – отвір корпусу клапанної коробки»;  $q_{\sigma}$  - витік у з'єднанні «золотник – отвір корпусу серворозподільника»;  $q_{п\sigma}$  - витік у поєднанні «поршень - сервоциліндр»;  $q_{к\sigma}$  - витік у запобіжному клапані;  $q_{ш\sigma}$  - витіку в з'єднаннях насоса підживлення.





**Рис. 3.32.** Шляхи підвищення довговічності.

Встановлені кінематичні режими електроіскрової обробки, що дозволяють отримати максимальну товщину покриття: швидкість переміщення електрода 0,25 мм/хв і швидкість обертання деталі 0,33 мм/хв. Оцінку мікротвердості електроіскрових покриттів проводили на глибині 65-75 мкм, при площі опорної поверхні не менше 80%.

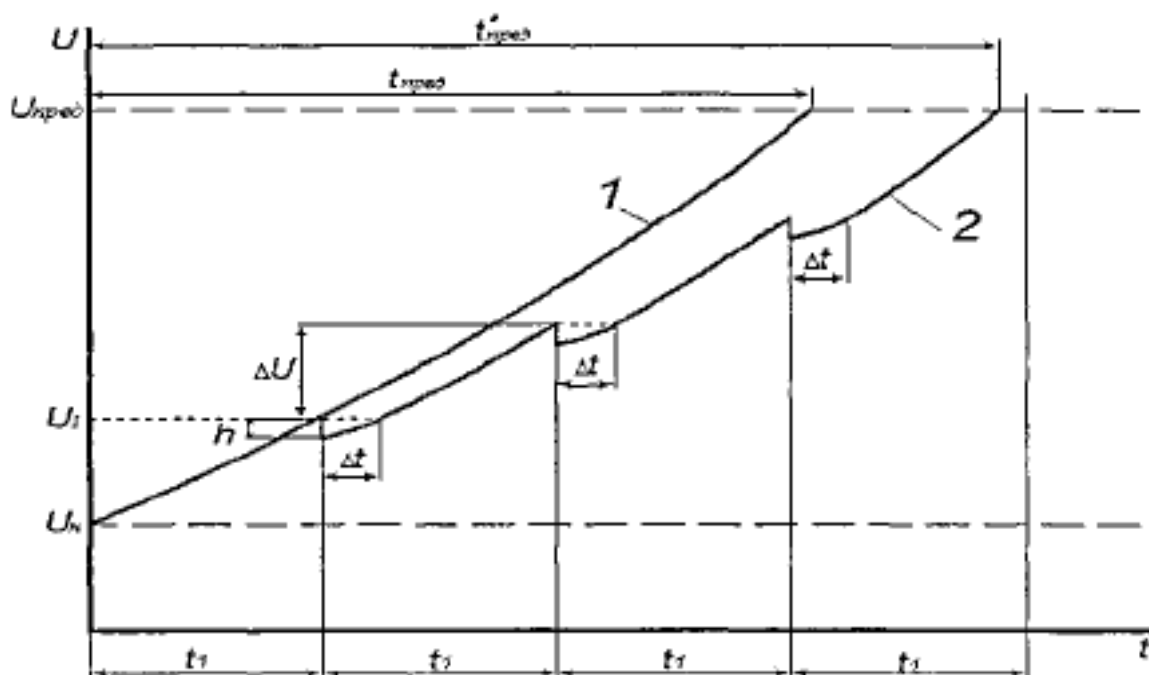


**Рис. 3.33.** Загальний вигляд установки для ЕІН в механізованому режимі:

1 - верстат токарно-гвинторізний 1А616; 2 – установка «ALIER-31» 3 – обробна головка «VI-1»; 4 - частотний перетворювач безступінчастого регулювання швидкості поздовжнього переміщення електрода; 5 – мотор-редуктор; 6 - частотний перетворювач безступінчастого регулювання швидкості обертання деталі.

Працездатність гідроприводу, зокрема гідравлічних розподільників, багато в чому визначається технічним станом золотникових пар, призначених для розподілу потоків робочої рідини. Незважаючи на різноманітність конструкцій та специфічні особливості функціонування, гідророзподільники мають загальні елементи, працездатністю яких визначається їхня надійність. Найбільш поширеним і важко усунувним дефектом є знос золотникова пара. Коефіцієнт повторюваності даного дефекту дорівнює одиниці. Ресурс секційних гідророзподільників має становити не менше 4 років, при напрацюванні 6000 машч. Для гідравлічних розподільників серій Р75, Р80 середній ресурс має бути не менше 4000 маш.г. Однак, як показав аналіз підприємств, що експлуатують СДМ, передчасні зноси золотникових пар призводять до того, що термін служби секційних пар розподільчих агрегатів становить близько 3 років, при середньому

напрацюванні 3600 машч, а розподільників серії P75 становить 2030 машч. На початку експлуатації золотникової пари ресурсний параметр відповідає початковому значенню  $U_H$ , рис. 3.34.

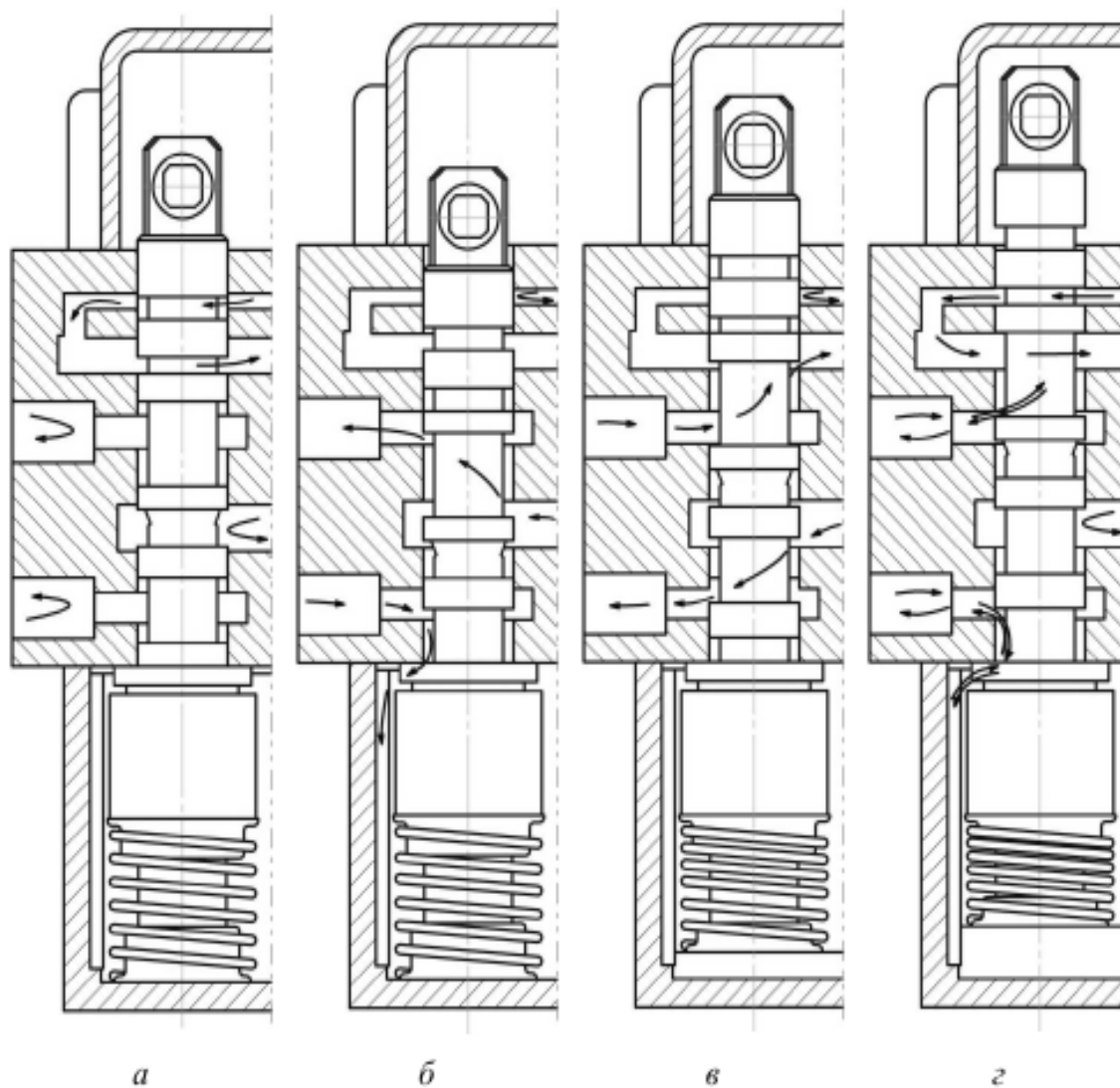


**Рис. 3.34.** Схема формування ресурсу золотникової пари.

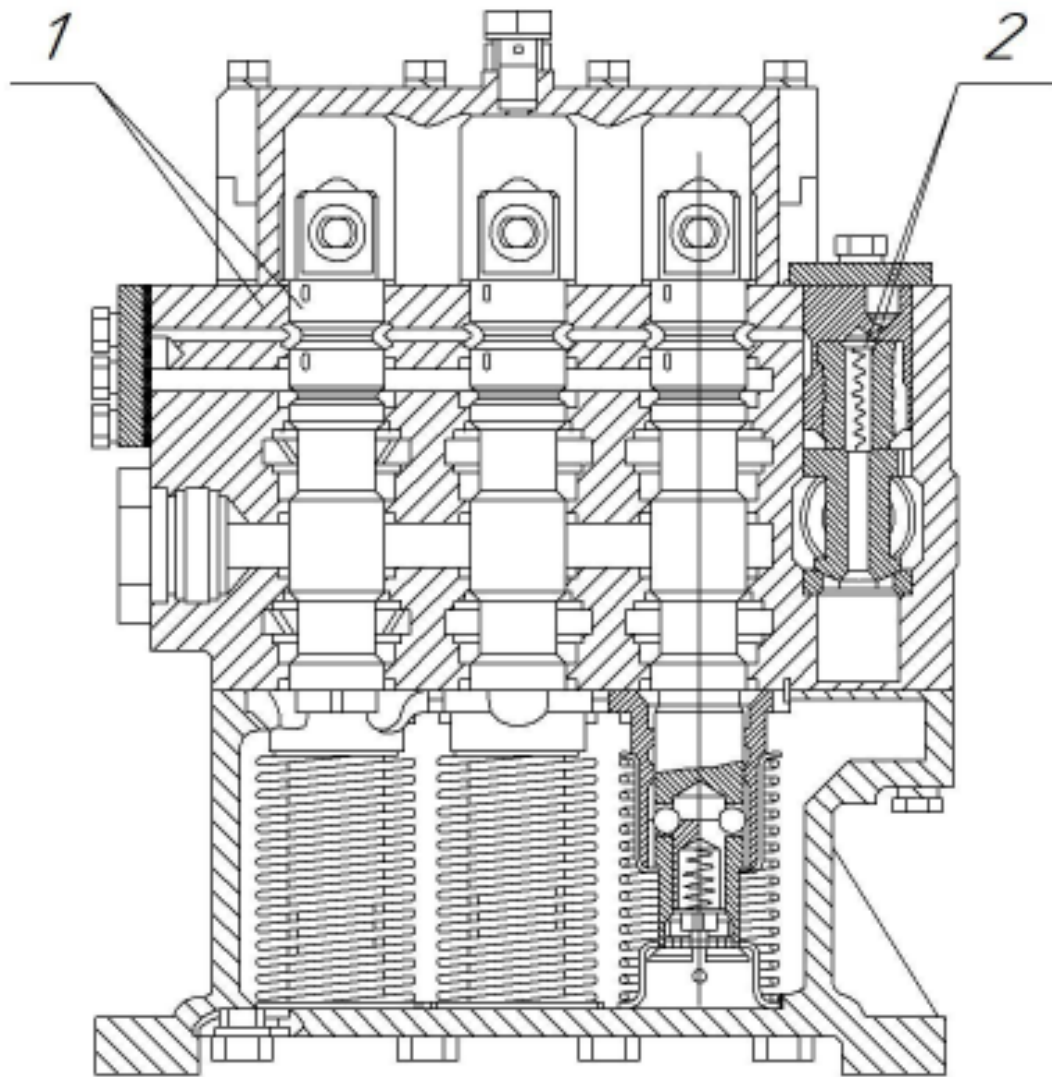
При періодичному через напрацювання  $t_n$  застосування металоплакуючого методу відбувається нанесення покриття товщиною  $h$ , що частково відновлює ресурсний параметр (зменшується величина зазору золотникової пари на величину  $\Gamma$ ). Залежно від використовуваного металоплакувального складу, шар покриття також зношується по степеневій залежності, але може мати різну швидкість зношування, як меншою ніж поверхні золотникової пари, так і більшою. Часткове відновлення зазору сполучення на величину шару  $h$  призводить до збільшення ресурсу на величину  $\Delta t$ , тому в результаті як одноразового застосування технічного впливу на відновлення ресурсного параметра, а також багаторазового, через напрацювання  $th$  повний ресурс  $t'_{ред}$  (перетин кривої 2 з лінією граничного зазору  $U_{,pe<}$ ) перевищує ресурс  $t_{ред}$  (перетин кривої 1 з лінією граничного проміжку  $U_{пред}$ ). Загалом, повний ресурс залежить від періодичності технічних впливів  $t_t$  відновлення ресурсного



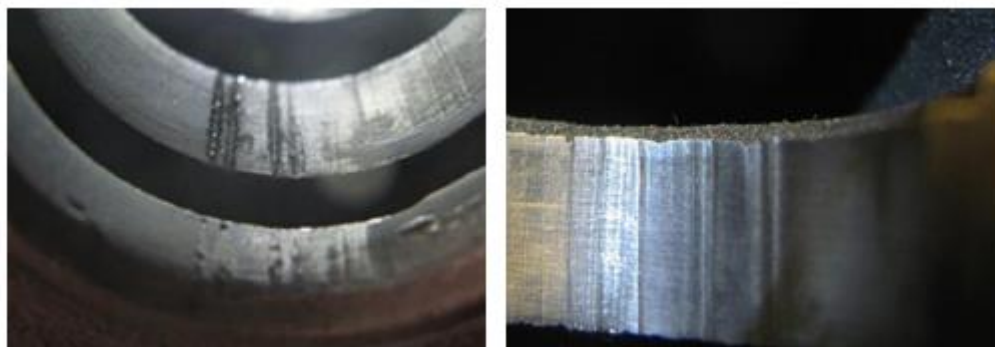
параметра, величини шару  $h$  і залежностей зміни ресурсного параметра золотникової пари з покриттям та без нього від напрацювання.



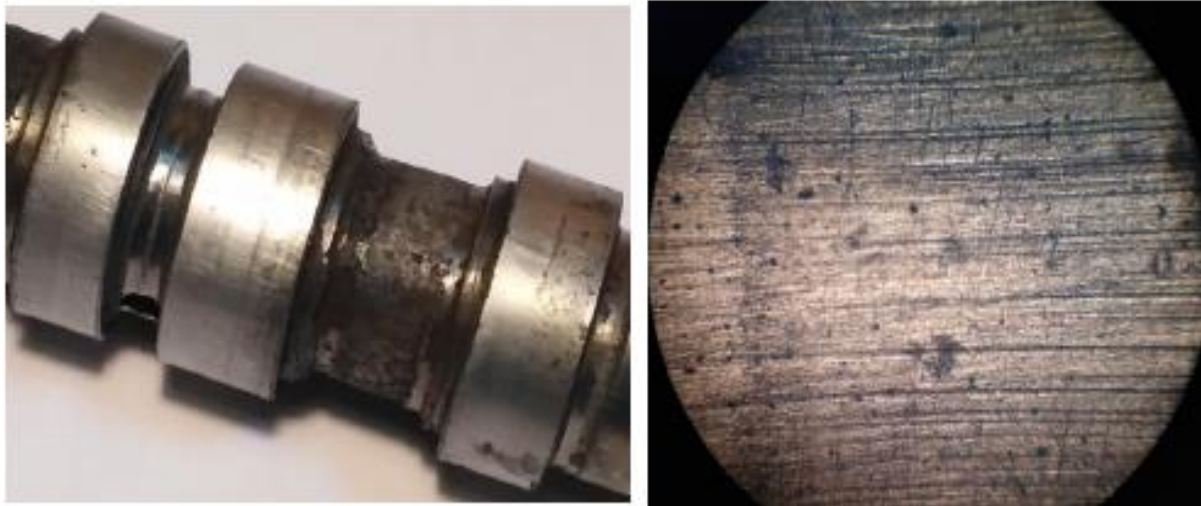
**Рис.3.35.** Схема роботи золотників гідророзподільника: а-нейтральне положення золотників; б-положення «підйом»; в-положення « примусове опускання»; г-плаваюче положення.



**Рис. 3.36.** Прецизійні пари гідророзподільника : 1 - «золотник - корпус»; 2 - «перепускний клапан - спрямовуюч».



**Рис. 3.37.** Зношена поверхня робочих пасків отворів корпусу гідророзподільника



**Рис. 3.38.** Зношена поверхня робочих пасків золотника.

Виток робочої рідини по зазору золотникової пари, функціонально пов'язаних із ресурсом: зазору пари, відхилень геометричної форми золотника та отвори корпусу, розташування золотника в отворі корпусу, пошкоджень прецизійних поверхонь. Виконано аналіз різних випадків розташування циліндричних та еліпсних деталей щодо один одного, який у сукупності з аналізом силової взаємодії робочих поверхонь золотника та отвори показує, що внаслідок зношування отвір набуває форми еліпса з головною віссю у поперечній площині корпусу гідророзподільника, а золотник у поздовжній.

**Таблиця 3.11.** Нормовані значення параметрів технічного стану нових гідророзподільників.

Марка гідророзподільника	Герметичність по золотниковим парам, не більш
P80	150 см <sup>3</sup> за 30 хв при статичному протитиску 7МПа
P100	180 см <sup>3</sup> за 30 хв при статичному протитиску 6,5 МПа
P160	300 см <sup>3</sup> за 30 хв при статичному протитиску 6,5- 7,5 МПа

Таблиця 3.12 Хімічний склад матеріалів, що застосовуються для виготовлення золотникових пар, %.

Марка матеріала	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cu	Mo	Al	Cr
				не более						
Сталь 9ХС	0,85–0,95	1,2–1,6	0,3–0,6	0,35	0,03	0,03	0,3	0,2	–	0,95–1,25
Сталь 15Х	0,12–0,18	0,17–0,37	0,4–0,7	0,3	0,03	0,03	0,3	–	–	0,7–1,0
Чугун СЧ21	3,3–3,5	1,4–2,2	0,7–1,0	–	0,15	0,2	–	–	–	–

Таблиця 3.13 Фізико-механічні властивості матеріалів, що застосовуються для виготовлення золотникових пар.

Марка матеріалу	Межа міцності, МПа	Межа текучості, МПа	Відносне подовження при рориві, %	Відносне звуження, %	Ударна вязкість, кДж/м <sup>2</sup>	Модуль пружності, МПа	Щільність, г/м <sup>3</sup>
Сталь 9ХС	790	445	26	54	390	1,9	7830
Сталь 15Х	690	490	12	45	690	2,15	7830
Чавун СЧ 21	210	-	-	-	-	1,0	7100

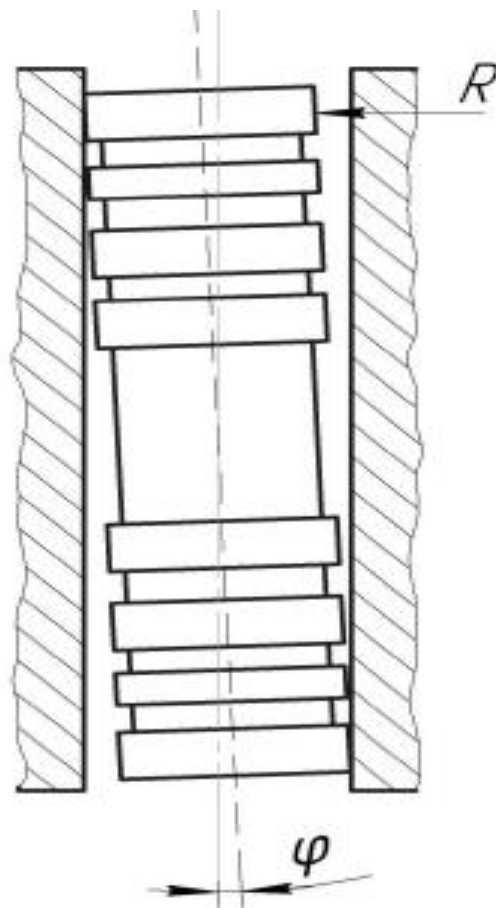
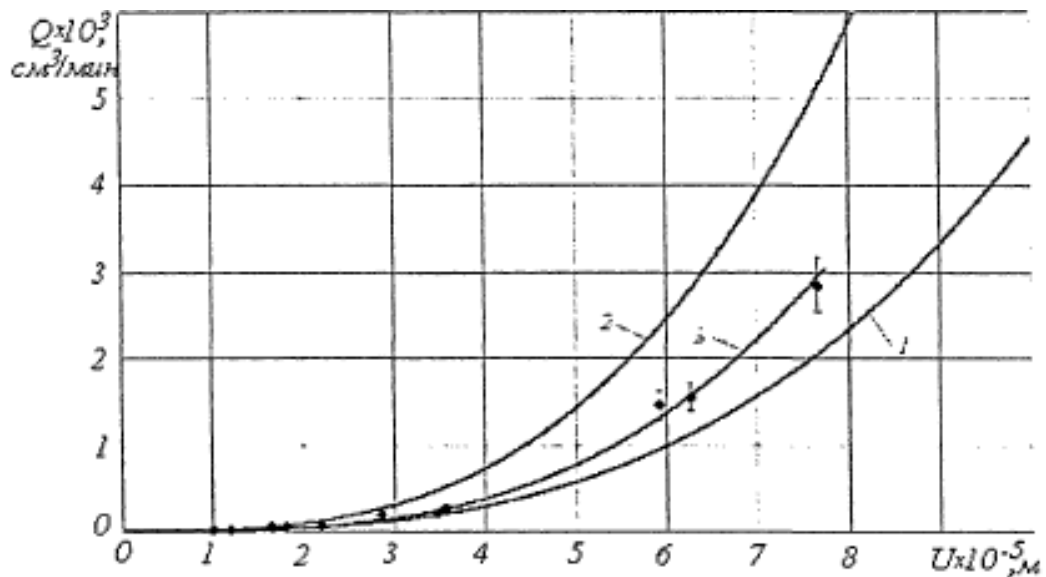


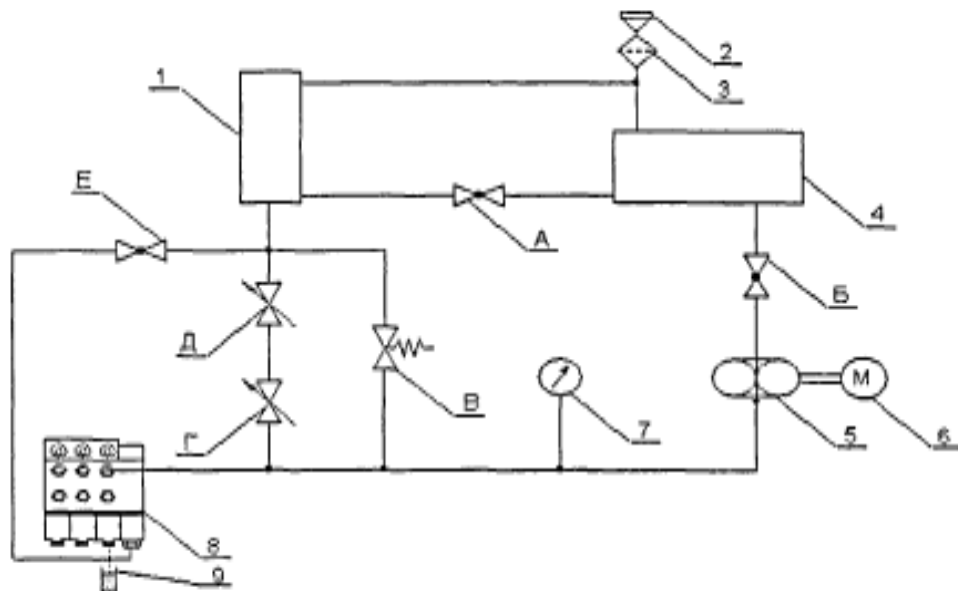
Рис.3.39 Схе́ма контакту деталей золотникової пари гідророзподільника при відносному перекосі:  $R$  - неврiвноважена сила, що викликає переко́с золотника;  $\varphi$  - кут переко́су золотника.

Для золотникової пари гідророзподільника серії P75 виконано розрахунок витоків робочої рідини у разі концентрично розташованих деталей (рис. 3.40, крива 1) та у разі граничного зміщення золотника до стінці втулки (рис. 3.40., крива 2). Справжні виток, залежно стану деталей золотникових пар, набувають значення між лініями 1 і 2.

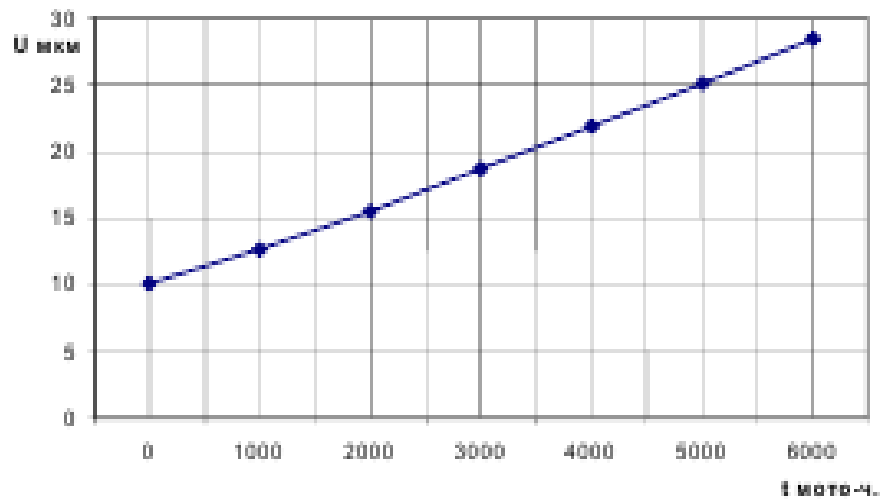


**Рис.3.40.** Вплив коефіцієнта витрати на витік робочої рідини за зазором золотникової пари.

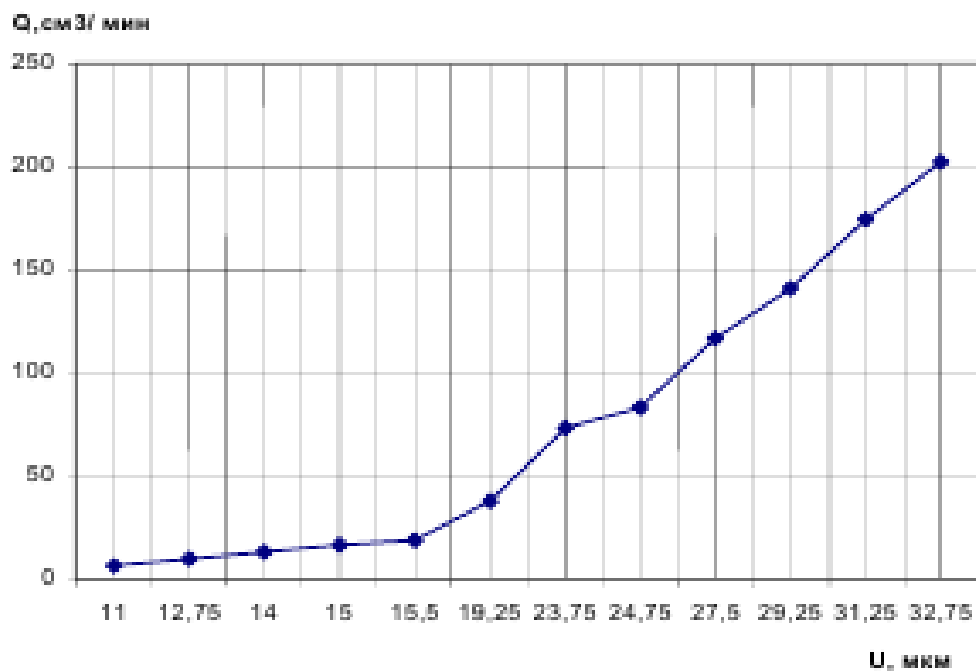
Експериментально отримано ряд точок, що характеризують дійсну витік (рис. 6, крива 3), на основі мікрометражу деталей золотникових пар і випробування на стенді КІ1774 (за схемою, рис. 3.41.) гідравлічних розподільників на доробку від  $t = 0$  маш.г, до  $t = 3400$  маш.г.



**Рис.3.41.** Гідравлічна схема: 1 - бак мірний стенда; 2 - горловина заливна; 3 - фільтр; 4 - бак видатковий; 5 - насос; 6 - привід насоса; 7 манометр; 8 випробуваний гідророзподільник, 9 ємність для збору рідини, А, Б, Е крани; У запобіжний клапан; Г, Д дроселі.



**Рис. 3.42.** Залежність зносу золотникової пари гідророзподільника (U) від ресурсу (t) при використанні гідроприводу робочої рідини до 13 класу чистоти.



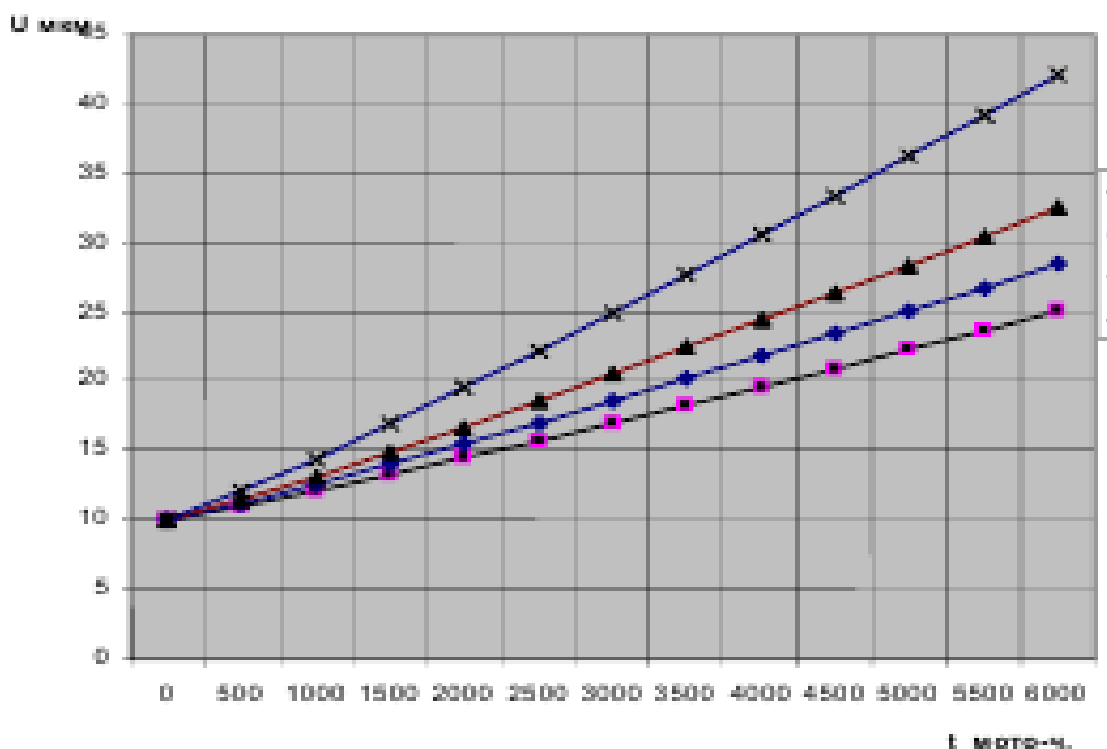
**Рис.3.43.** Залежність витоків Q від зазору золотникової пари U.

Дійсна витрата (відпливу) робочої рідини можна записати уточненим аналітичним

співвідношенням:

$$Q_{зм} = 6,571 \frac{\pi \cdot d \cdot \Delta P \cdot U^{3,16}}{12 \mu \cdot l}$$





**Рис.3.44.** Залежність зносу золотникової пари гідророзподільника ( $U$ ) від ресурсу ( $t$ ) та класу чистот робочої рідини ( $\mathcal{C}$ ), м.

На підставі отриманих експериментальних даних визначили коефіцієнт  $b$ , що характеризує швидкість зношування сполучення золотникової пари для різних класів чистоти робочої рідини  $\mathcal{C}$ . ( $b=0,00105$  для 12 класу;  $b=0,00129$  для 13 класу;  $b=0,00157$  для 14 класу ;  $b = 0,00224$  для 16 класу). Зіставивши подані висновки та результати вимірювань зношування золотникових пар у роботі, а також математично обробивши дані на ЕОМ, отримуємо залежності зміни зазору золотникової пари від напрацювання та чистота робочої рідини, представлені графічно. (рис.3.44). Подана діаграма наочно показує пряму залежність зносу  $U$  (мкм) від ресурсу  $t$  (мото-г.) і класу чистоти  $\mathcal{C}$  робочої рідини (ГОСТ 17216-2001), що використовується в гідравлічній системі.



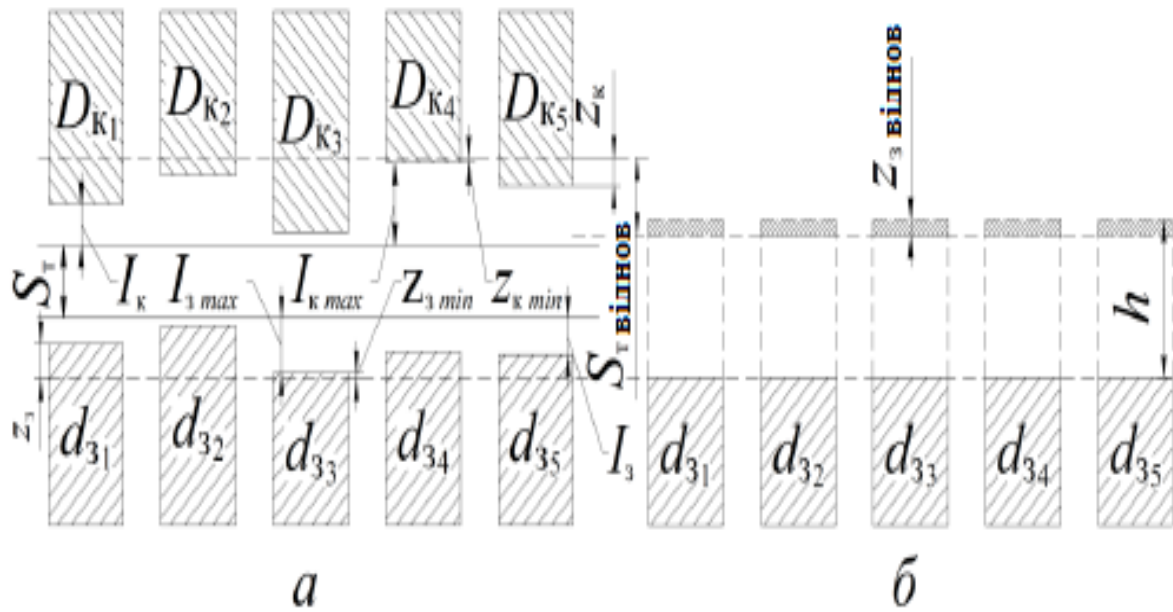
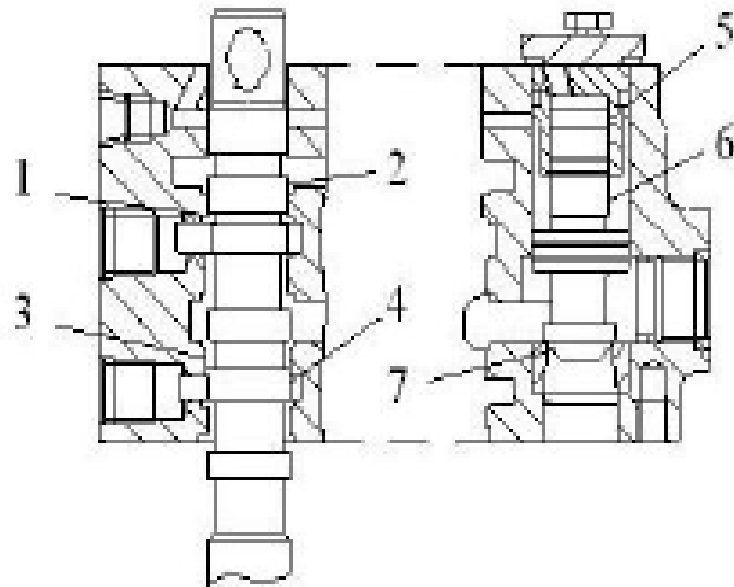


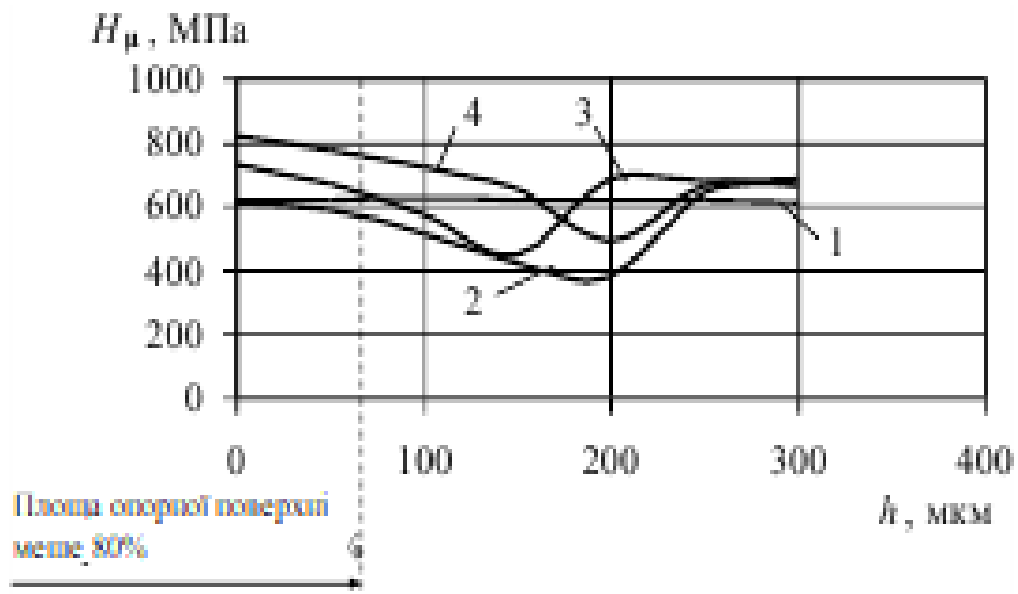
Рис. 3.45. Схема зношеного стану (а) і відновлення (б) золотникової пари гідророзподільника.



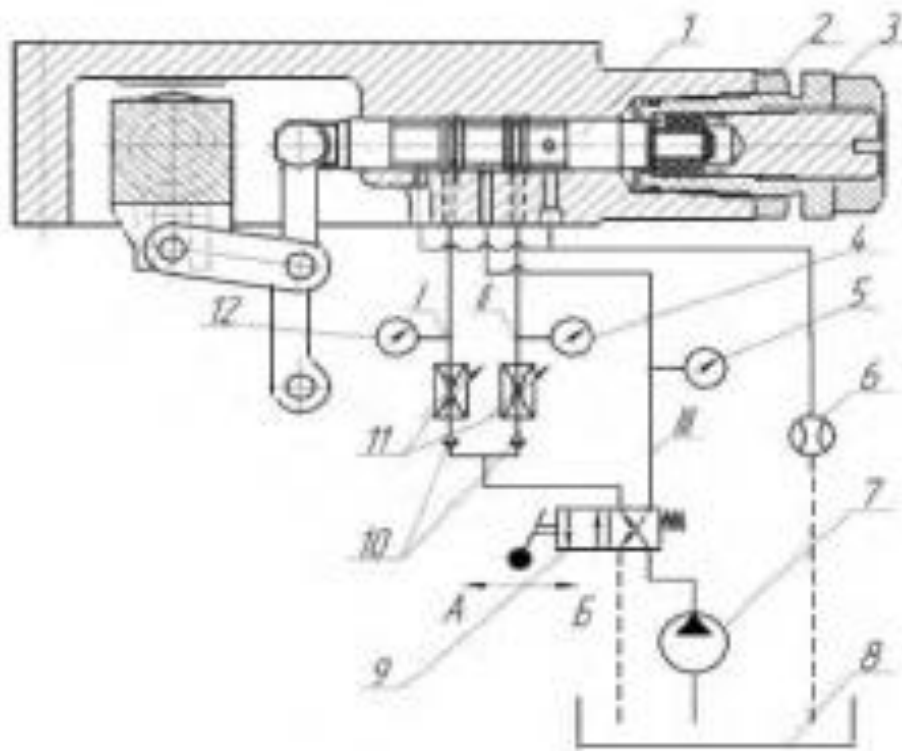
Рис. 3.46. Аналіз способів відновлення робочої поверхні золотникової пари і гідророзподільника.



**Рис. 3.47.** Фактори, що впливають на загальний витік рідини: 1, 3 – знос другого і четвертого пасків корпусу в зоні перекриття; 2, 4 – знос другого і п'ятого пасків золотника в зоні перекриття; 5 – знос внутрішньої поверхні направляючої; 6, 7-знос направляючої і конічної поверхонь клапана.



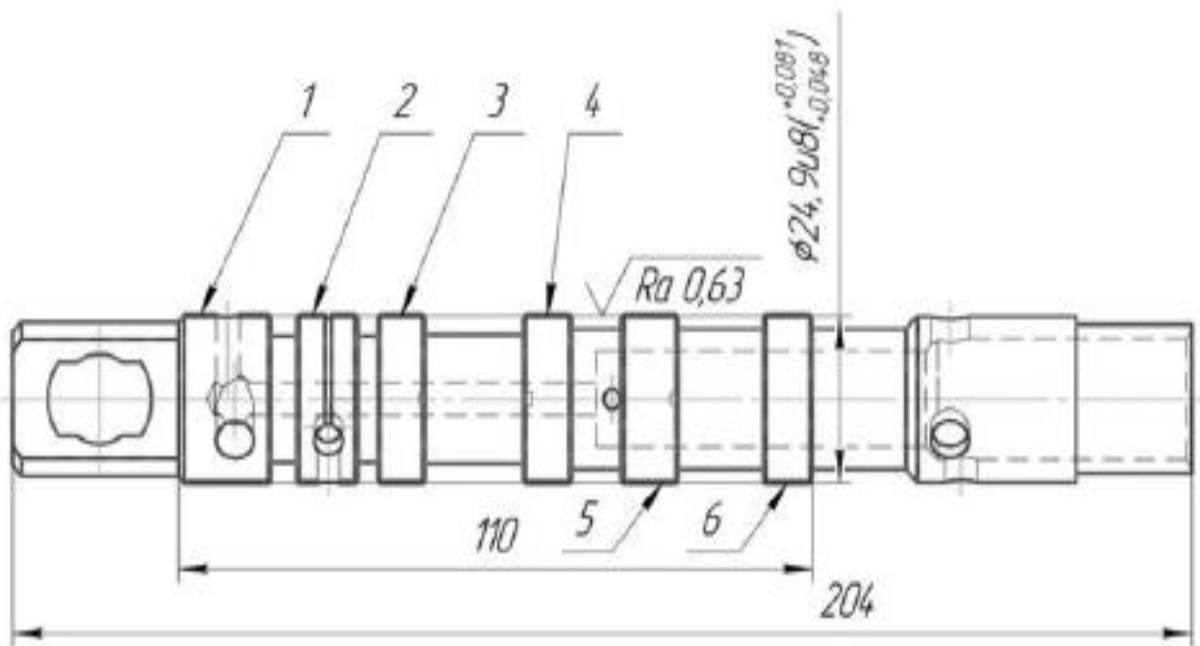
**Рис. 3.48.** Мікротвердість покриттів зразків: 1 – Сталь 20Х; 2 – Сталь 20Х+65Г; 3 – Сталь 20Х+65Г+СО<sub>2</sub>; 4-Сталь 20Х+65Г+С (порошок).



**Рис. 3.49.** Гідравлічна схема підключення серворозподільника: 1 – золотник; 2 – гайка; 3 – склянка; 4, 5, 12 – манометри; 6 – витратомір; 7 – насос НШ-10; 8 – бак для робочої рідини; 9 – розподільник; 10 - зворотний клапан; 11 – дросель; I, II та III - гідролінії; А і Б – положення розподільника.

**Таблиця 3.14. Оптимальні режими ЕІН зразків із латуні ЛМЦСКА-58-2-2-1-1.**

Установка	Марка електрода	Енергія імпульсу $W_{\text{и}}$ , Дж	Частота подачі імпульсу $f_{\text{и}}$ , Гц	Час зміцнення тоб, хв	
"А 31"	ЛІЕР	ЛМЦСКА-58-2-2-1-1	0,036	1280	4
"А 31"	ЛІЕР	Мо	0,036	1600	2



**Рис. 3.50.** Обробляемі поверхні при електроіскровій обробці.



**Рис. 3.51.** Зразок для вимірювання товщини покриття

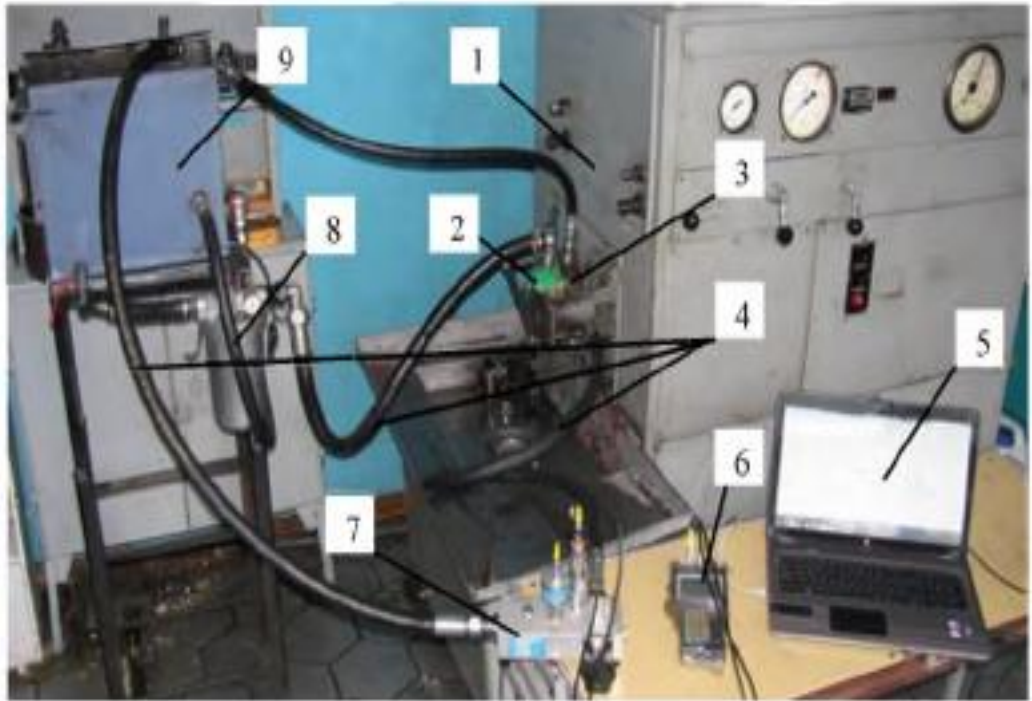
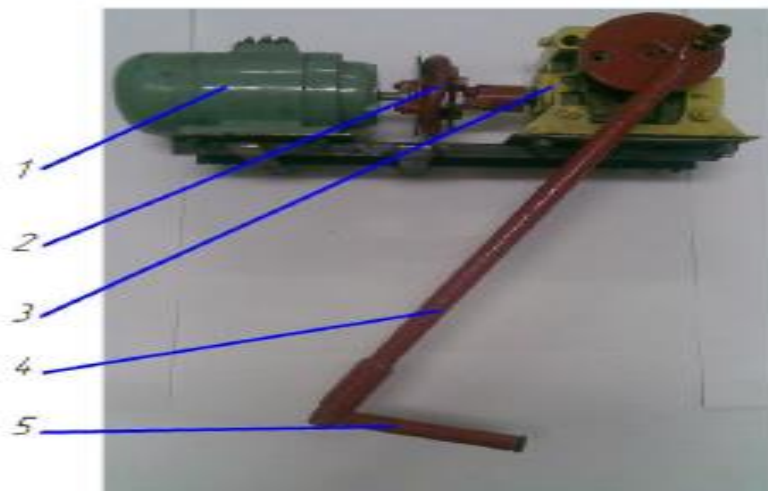


Рис. 3.52. Загальний вигляд випробувального стану KI-4815M: 1 – стенд KI-4815M; 2 - насос підживлення; 3 - спеціальний пристрій для кріплення насоса до стану; 4 - лінії всмоктування та нагнітання; 5 – ПК; 6 - портативний зчитувальний пристрій НРМ-540-05-0С; 7 - реверсивний дросель-витратомір Webtec; 8 – фільтр очищення з вакуумметром; 9 – бак для робочої рідини.



**Рис.3.53** Пристосування до гідравлічного стану для випробування гідророзподільників: 1 - електродвигун; 2 - пружна муфта; 3 - черв'ячний редуктор; 4 - шатун; 5 - подовжувач.



**Рис.3.54.** Схема технологічного процесу відновлення золотникових пар гідророзподільника.

Завдання оцінки методів та матеріалів покриттів для відновлення зношених поверхонь деталей вирішувалося на базі знань та досвіду фрикційного матеріалознавства. Розглянуто варіанти технологічних схем для відновлення та підвищення зносостійкості ресурсовизначальних пар гідроагрегатів з використанням методу ЕЮ та фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО). Для круглих шестеренних насосів НШ серії А:

- варіант 1: напівотвір підшипникової обойми розточений під ремонтний розмір, цапфа відновлена методом ЕЮ з подальшим шліфуванням у розмір;
- Варіант 2: напівотвір підшипникової обойми розточено під ремонтний розмір з подальшим зміцненням поверхні методом ЕЮ, цапфа відновлена методом ЕЮ з подальшим шліфуванням у розмір. Для гідравлічних розподільників: варіант 1: отвір розгорнуто алмазною розгорткою під збільшений розмір, золотник відновлений методом ЕЮ з подальшим шліфуванням у розмір;



- Варіант 2: отвір розгорнуто алмазною розгорткою під збільшений розмір, золотник відновлений методом ЕІО з подальшим шліфуванням і ФАБО міддю. Для гідравлічних циліндрів:

- варіант 1: знос отвору передньої кришки відновлений сплавом з ніхрому методом ЕІО з подальшим розгортанням, шток з покриттям гальванічним хромом не відновлюється; - варіант 2: знос отвору передньої кришки відновлений сплавом з ніхрому методом ЕІО з подальшим після механічної обробки нанесенням приробітного покриття з міді методом ЕІО, шток з покриттям гальванічним хромом не відновлюється. З аналізу умов взаємодії робочих поверхонь деталей слід, що всіх досліджуваних варіантів технологічних схем поверхні деталей також працюють у режимі зовнішнього тертя, а зонах контакту мають місце пластичні деформації з утворенням насиченого контакту.

При ремонті круглих шестеренних насосів на зношені поверхні цапф шестерень наноситься покриття електродом зі сталі 65Г  $\varnothing$  3,8 мм методом електроіскрової обробки з використанням незалежного генератора «ELITRON-22В» на п'ятому енергетичному режимі, з енергією розряду 1,66 Дж. за моделлю (19) залежно від діаметра цапфи шестерні. Напівотвори підтискної напівобойми після розточування обробляють методом електроіскрової обробки з використанням генератора «ALIER-31» електродом з міді М1 3 мм на 3-му енергетичному режимі, з коефіцієнтом енергії 1. Час обробки  $t_L = 1,8$  хв/см<sup>2</sup>.

При ремонті гідравлічних розподільників отвір у корпусі обробляється спеціальною розгорткою до виведення слідів зношування. Покриття наноситься на золотник електродом зі сталі 65Г  $\varnothing$  3,8 мм методом електроіскрової обробки з використанням незалежного генератора «ELITRON-22В» на п'ятому енергетичному режимі, з енергією розряду 1,66 Дж. Оптимальні кінематичні режими визначаються за моделлю (19) залежно від діаметр золотника.

Після обробки золотника розмір отвору на його пояски наноситься приробіткове покриття стрижнем з латуні Л65  $\varnothing$  4 мм, з додаванням до зони обробки спеціального складу, на режимах: частота обертання золотника 250–300 об/хв,

питомий тиск 40– 50 МПа, подача 0,1–0,2 мм/об, число проходів  $i = 1$ . Конічну поверхню клапана після виведення слідів зношування зміцнюють методом електроіскрової обробки з використанням генератора «ALIER-31» електродом із твердого сплаву ВК8  $\varnothing 2$  мм на 3-му енергетичному режимі, з коефіцієнтом енергії 1. Час обробки. тупр = 0,96 хв/см<sup>2</sup>. Після зміцнення поверхню полірують.

**Таблиця 3.15. Результати дефектації деталей об'ємного гідроприводу гідроприводу ГСТ-112.**

Деталь об'ємного гідроприводу	Дефект деталі	Ескіз	Коефіцієнт повторюваності дефекту
Розподільник латунний	Зношування поверхні розподільника, що контактує зі сталевим розподільником		0,97
Розподільник латунний	Знос по висоті		0,4
Розподільник латунний	Знос поверхні розподільника, що контактує з блоком циліндрів		0,11
Деталь об'ємного гідроприводу	Дефект деталі	Ескіз	Коефіцієнт повторюваності дефекту
Розподільник сталевий	Зношування поверхні розподільника, що контактує з латунним розподільником.		0,95
Розподільник сталевий	Знос по висоті		0,36
Розподільник сталевий	Зношування поверхні розподільника, що контактує з задньою кришкою корпусу		0,07
Вал гідронасосу (гідромотора)	Зношування шліць по товщині приводного валу		0,29

Продовження табл. 3.15

Вал гідронасосу (гідромотора)	Зношування шліць поверхні привідного блоку по товщині		0,1
Вал гідронасосу (гідромотора)	Зношування шліць по товщині приводного валу		0,4
Поршень	Зношування зовнішньої поверхні поршня		0,83
Поршень	Осьовий зазор п'яти в поршні		0,71
Поршень	Знос по висоті опорної поверхні п'яти		0,9
Поршень	Зношування поверхні п'яти		0,04
Поршень	Зношування опорної поверхні п'яти (тріщини, задираки, ризики)		0,86
Поршень	Зношування внутрішніх отворів втулок блоку циліндрів		0,1
Поршень	Зношування поверхні блоку циліндрів, що контактує з латунним розподільником		0,02
Поршень	Знос шліців по товщині		

Продовження табл. 3.15

Деталь об'ємного гідроприводу	Дефект деталі	Ескіз	Коефіцієнт повторюваності дефекту
Задня кришка корпусу	Знос шліців по товщині		0,09
Задня кришка корпусу	Зношування поверхні задньої кришки, що контактує зі сталевим розподільником		0,16
Задня кришка корпусу	Тріщини, вибоїни та глибокі ризики привалочної поверхні		0,04
Задня кришка корпусу	Зрив різьблення більше однієї нитки		0,35
Задня кришка корпусу	Гідроплотність зворотних клапанів		0,68
Корпус клапанної коробки	Зношення внутрішніх отворів клапанної коробки під золотник		0,06
	Зрив різьблення більше однієї нитки		
Золотник клапанної коробки	Знос зовнішньої поверхні золотника		0,66
Опора	Зношування поверхні опори, що контактує з опорною поверхнею п'яти		0,36
	Знос по висоті		

Продовження табл. 3.15

	Зрив різьблення більше однієї нитки		0,01
Золотник серворозподільника	Знос зовнішньої поверхні золотника		0,27
Корпус серворозподільника	Зрив внутрішніх отворів серворозподільника під золотник		0,3
Корпус серворозподільника	Зрив різьблення більше однієї нитки		0,03

Прогноз середнього ресурсу відремонтованих гідроагрегатів за результатами лабораторних випробувань зразків пар тертя та експлуатаційних спостережень показав, що для забезпечення середнього міжремонтного ресурсу не нижче доремонтного необхідно, щоб зносостійкість відновлених деталей ресурсовизначальних сполучень круглих шестеренних насосів була вищою, ніж у нових, в 1,38 рази; гідравлічних розподільників – у 1,39 раза, гідроциліндрів – у 1,41 раза. 4. Визначено оптимальні енергетичні та кінематичні параметри процесу нанесення покриттів для відновлення гідроагрегатів: 1) при ручній електроіскровій обробці чавуну СЧ21 електродом з Х20Н80 з використанням залежного генератора «ALIER-54»: – для відновлення внутрішніх отворів до 786 мкм: кількість енергії 500 Дж, час обробки 87, діаметр електрода 5 мм; - Для відновлення внутрішніх отворів передніх кришок гідроциліндрів зі зносами до 220 мкм: кількість енергії 150 Дж, час обробки 39 с, діаметр електрода 5 мм; 2) при механізованій обробці зразків з низьковуглецевої конструкційної легованої сталі 20Х (18ХГТ) електродом зі сталі 65 Г

3

використанням незалежного генератора «ELITRON-22В»: – для відновлення золотників Ø25 мм та цапф шестерень Ø30 мм: поздовжня /про, частота обертання деталі: золотника 1,82 об/хв; цапфи шестерні 1,52 об/хв.

З представленою прогнозу випливає, що для забезпечення середнього міжремонтного ресурсу на рівні доремонтного середнє значення зносостійкості сполучень з відновленими деталями має бути вищим, ніж у нових: для круглих шестеренних насосів у 1,38 раза, гідророзподільників у 1,39 раза та гідроциліндрів у 1,41 раз.

Таблиця 3.16. Результат розрахунку коефіцієнта тертя та його складових

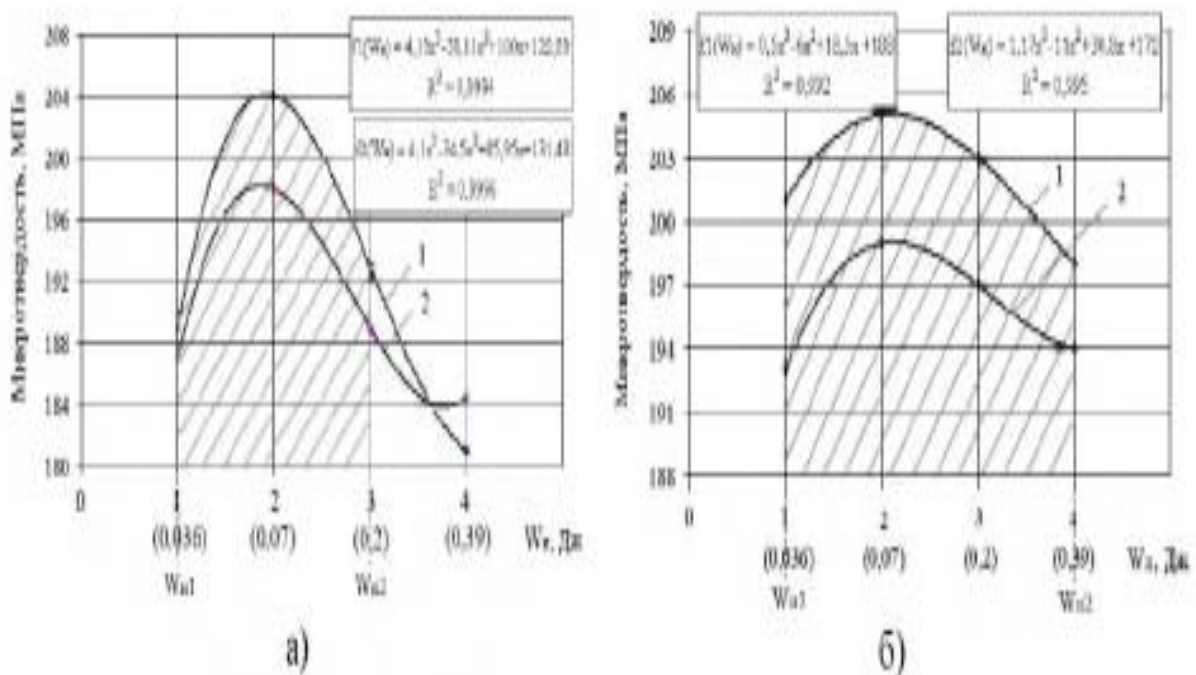
коефіцієнт тертя	Для спряжень круглих шестеренних насосів НШ серії А		Для гідравлічних розподільників		Для спряжень гідравлічних циліндрів	
	варіант 1	варіант 2	варіант 1	варіант 2	варіант 1	варіант 2
$f$	0,069	0,082	0,076	0,061	0,079	0,060
$f_a$	0,040	0,063	0,064	0,049	0,066	0,046
$f_m$	0,029	0,019	0,012	0,012	0,013	0,014

Таблиця 3.17. Розрахункові значення та результат розрахунку інтенсивності зношування деталей у ресурсовизначальних сполученнях гідроагрегатів

Пара тертя	$c$	$\beta$	$t_n$	$k_f^n$	$\delta_{5B}$	$I_n$
для круглих шестеренних насосів НШ серії А						
варіант 1	0,079	0,25	2,21	1,05	0,25	$3,43 \cdot 10^{-5}$
варіант 2	0,078	0,25	2,27	1,10	0,13	$2,62 \cdot 10^{-5}$
для гідравлічних розподільників						
варіант 1	0,073	0,25	2,9	1,044	0,27	$1,84 \cdot 10^{-7}$
варіант 2	0,073	0,25	2,9	1,032	0,27	$1,49 \cdot 10^{-7}$
для гідравлічних циліндрів						
варіант 1	0,053	0,21	2,77	1,04	0,31	$4,01 \cdot 10^{-7}$
варіант 2	0,052	0,21	2,96	1,03	0,31	$3,06 \cdot 10^{-7}$



Для реалізації процесу механізованої електроіскрової обробки обґрунтовано ефективність застосування незалежних генераторів імпульсів струму, в яких блок управління завжди подає сигнал на заряд та розряд конденсатора, незалежно від комутації електродів. Істотним недоліком цих типів генераторів є їхня невисока енергія розряду, максимальне значення якої становить 1,66 Дж для генератора «ELITRON22В». Розглянуто енергетичне забезпечення утворення каналу наскрізної провідності іскрових розрядів для відновлення зношених поверхонь деталей із сталей 20Х та 18ХГТ стрижневими електродами діаметром 3,8 мм із вмістом вуглецю від 0,1 до 1,0 %. Для нанесення покриттів при ручній електроіскровій обробці застосовували залежні генератори імпульсного струму «ALIER-31» та «ALIER-54», а при механізованій обробці комплекс БІГ-3, що складається з незалежного генератора імпульсів струму «ELITRON-22В» та обробного пристрою ВІ-1 .



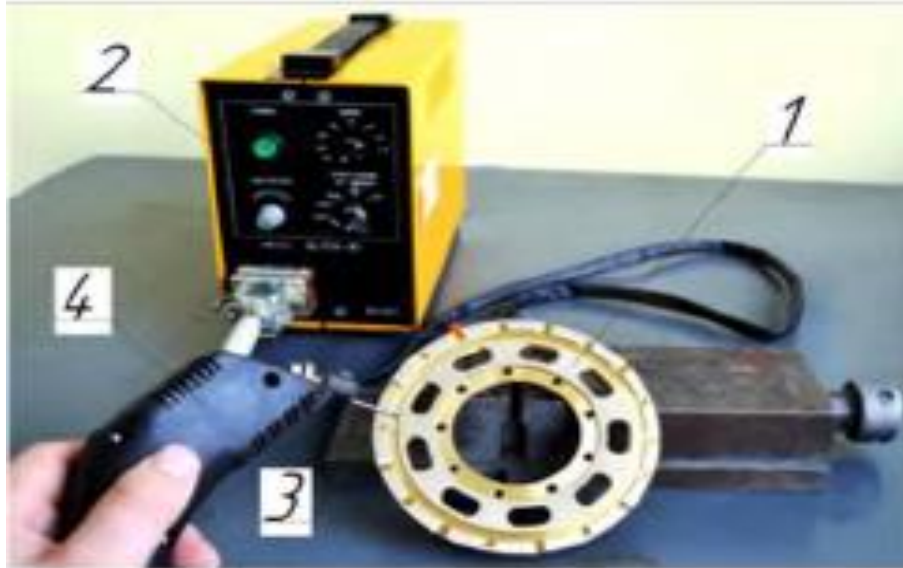
**Рис. 3.55.** Графіки зміни мікротвердості поверхні, що зміцнюється від енергії імпульсу: а) для електрода з латуні ЛМЦСКА-58-2-2-1-1; б) для електрода з молібдену Мо; 1 і 2 - криві вимірювання мікротвердості на глибині 20 та 30 мкм; матеріал основи латуні ЛМЦСКА-58-2-2-1-1.

Для зразків із сталі 20Х електродами із С від 0,08 до 1,0 % формуються покриття, що включають три шари. Перший шар «сірий», із середнім значенням мікротвердості 347,0–350,4 МПа, є окислами заліза. При застосуванні електродів із високовуглецевих сталей товщина оксидів на поверхні стає мінімальною. Мікротвердість другого шару збільшується в залежності від вмісту вуглецю в електродному матеріалі та змінюється в діапазоні від 485,2 до 761,8 МПа. Третій шар є зону термічного впливу, мікротвердість якої щодо загартованого матеріалу основи (642,2-654,2 МПа) знижується до значень 540,2-559,2, незалежно від вмісту вуглецю в матеріалі електрода. В результаті експериментів встановлено, **що при електроіскровій обробці зразка з алюмінієвого сплаву АК5М7 електродом міді М1 значення відносного подовження знизилося в 1,92 рази в порівнянні зі зразком без покриття. При нанесенні на поверхню зразка із чавуну СЧ21 електроіскрового покриття з ніхрому Х20Н80 значення відносного подовження збільшилося в 1,15 рази щодо зразка без покриття. Наступна електроіскрова обробка покриття з ніхрому Х20Н80 після механічної обробки електродом з міді М1 показала, що значення відносного подовження залишилося практично без зміни.**

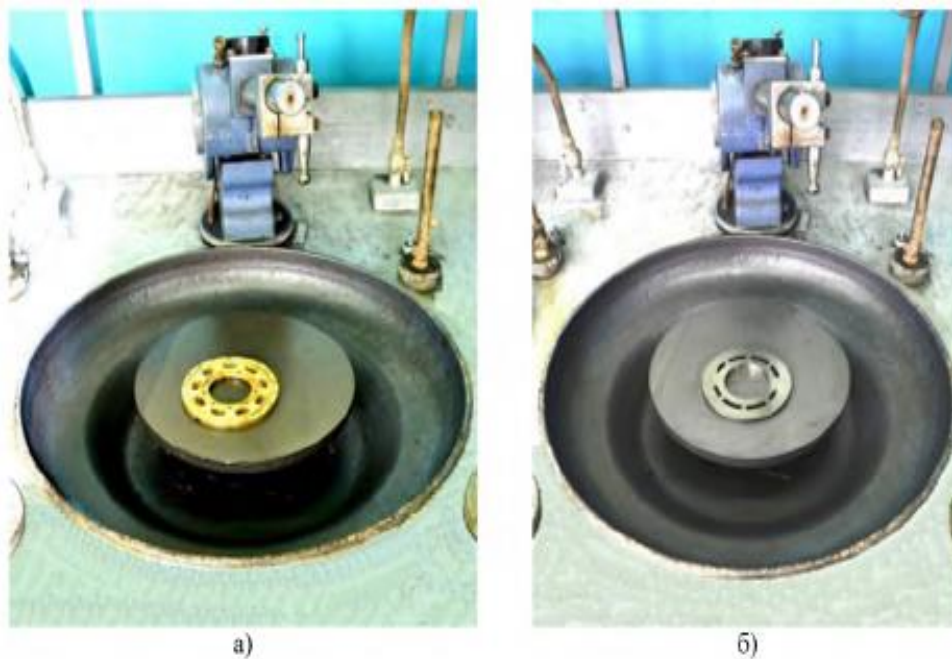
**Значення умовної межі плинності після електроіскрової обробки алюмінієвого сплаву АК5М7 електродом з міді М1 збільшилося на 80%, а після нанесення покриття з ніхрому Х20Н80 на зразок із сірого чавуну СЧ21 збільшення склало всього 4%.**

Дослідження фрикційних параметрів молекулярної складової коефіцієнта зовнішнього тертя показали, що у всіх парах, в яких на поверхню зразків нанесено покриття методом електроіскрової обробки, значення питомої міцності зсуву знижується, крім зразка з алюмінієвого сплаву АК5М7. Нанесення на поверхню, що зношує плівки товщиною 0,8...1,0 мкм методом ФАБО сприяло зниженню питомої зсувної міцності молекулярних зв'язків. Для досліджуваних електроіскрових покриттів значення параметра фрикційної втоми змінюються в діапазоні від 2 до 3 одиниць, що для пружно-пластичного контакту поверхонь. При цьому, як показують результати експериментів, електроіскрова обробка на

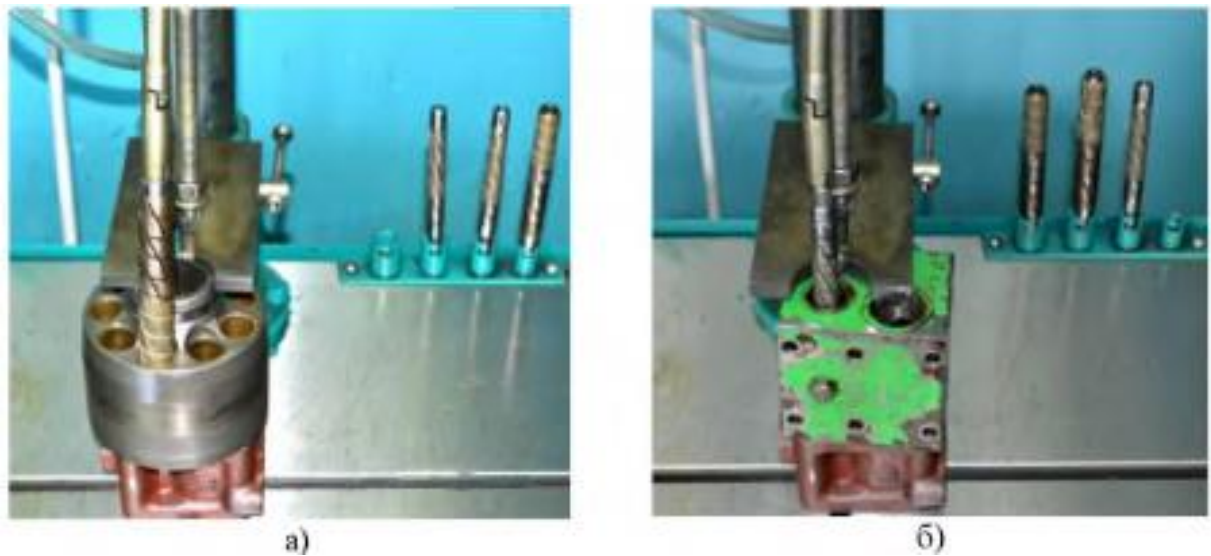
параметр фрикційної втоми незначно впливає. Результати експериментальної оцінки триботехнічних характеристик показали, що навантаження до попереду у всіх досліджуваних парах тертя вище, ніж розрахункова максимальна напруга на майданчику контакту трибосполучень гідроагрегатів.



**Рис. 3.56.** Зміцнення робочої поверхні латунного розподільника методом ЕІО: 1 – латунний розподільник; 2 – установка «ALIER-31»; 3 – електрод; 4 – електромагнітний вібратор.



**Рис. 3.57.** Доведення на чавунній плиті робочих поверхонь: а) латунного та б) сталевого розподільників.



**Рис. 3.58.** Механічна обробка на верстаті СПО-01 отворів: а) втулок блоку циліндрів; б) корпусу клапанної коробки алмазними розтискними розгортками.

Щодо базових зразків, у електроіскрових покриттів зі сталей 65Г і Х20Н80 навантаження до попереду знизилася на 1,6...6,2%, а при нанесенні шару приробітку методами ЕЮ і ФАБО підвищилася на 2,3...8,3%. Дослідження коефіцієнта тертя при розрахунковій експлуатаційній навантаженні показали, що нанесення покриттів методами ЕЮ і ФАБО дозволило знизити значення даного показника для всіх пар тертя, крім тієї, в якій зразок алюмінієвого сплаву АК5М7 оброблений електроіскровим методом електродом з міді. Експериментом встановлено, що у всіх досліджуваних парах тертя після нанесення електроіскрових покриттів інтенсивність зношування зразків, що зношуються, знижується щодо зразків пар тертя без покриттів. За результатами випробувань технічного ресурсу у доремонтний та міжремонтний періоди рядової експлуатації методом максимальної правдоподібності визначено параметри законів розподілу для кожного типу гідроагрегатів. Порівняння математичних очікувань функцій показало, що середній міжремонтний ресурс круглих шестеренних насосів вищий, ніж середній доремонтний, в 1,07 рази, гідророзподільники - в 1,24 рази, гідроциліндри - в 1,14 рази.

Встановлено, що значення комплексних характеристик шорсткості покриттів, сформованих різними електродними матеріалами, на кожному окремому

режимі генератора як при ручній, так і при механізованій обробці статистично значимо не відрізняються. При цьому на параметри шорсткості покриттів, сформованих методом ЕІО, статистично значуще впливають енергетичні режими генератора. Дослідження мікротвердості електроіскрових покриттів показало, що при обробці алюмінієвого сплаву АК5М7 на 4 режимі генератора ALIER31 електродом з міді мікротвердість збільшується на 205,8%, на 3 режимі – на 136%, на 2 режимі – на 89%. Мікротвердість покриття з ніхрому Х20Н80 на сірому чавуні СЧ21 на глибині до 1000 мкм становить 218,9 МПа, понад 1000 мкм і до 1250 мкм зростає до значення 592,2 МПа і потім знижується до мікротвердості матеріалу основи. Товщина термодифузійної зони складає 250 мкм. При електроіскровій обробці зразків із сталі 20Х електродами із вмістом вуглецю від 0,08 до 1,0 % формуються покриття, що включають три шари. Перший шар «сірий», із середнім значенням мікротвердості 347,0–350,4 МПа, є оксидами заліза. Мікротвердість другого шару покриття, сформованого електродом із (С) 0,1 %, становить 485,2 МПа, із вмістом 0,2 % С – 506,1 МПа, із вмістом 0,65 % С – 626, 1 МПа та із вмістом 1 % С – 761,8 МПа.

При нанесенні на поверхню зразка із сірого чавуну СЧ21 електроіскрового покриття з ніхрому Х20Н80 значення відносного подовження збільшилося в 1,15 рази порівняно із зразком без покриття. Наступна електроіскрова обробка покриття з ніхрому Х20Н80 після механічної обробки електродом з міді М1 показала, що значення відносного подовження на поверхні залишилося без зміни. Після електроіскрової обробки поверхні зразка з алюмінієвого сплаву АК5М7 електродом з міді М1 значення умовної межі плинності збільшилося на 80%, а значення умовної межі плинності покриття з ніхрому Х20Н80 відрізняється від матеріалу основи СЧ21 всього на 4%.

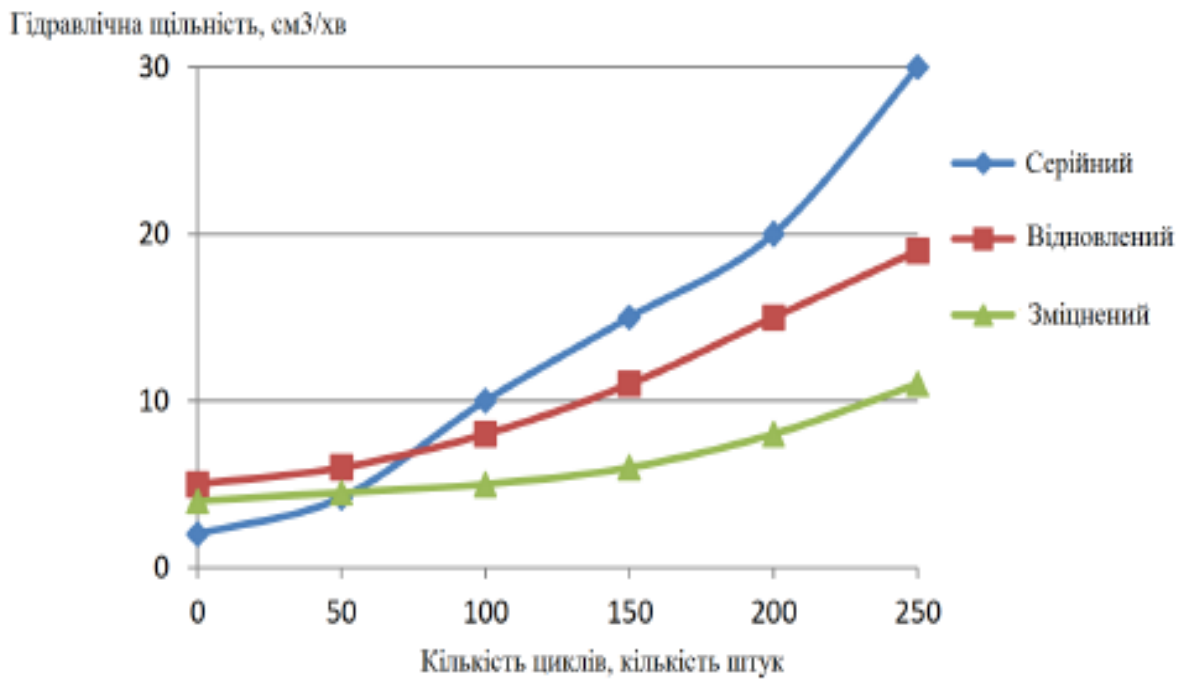


Рис.3.59. Графіки результатів оцінки зносостійкості за гідравлічною щільністю.

Таблиця 3.18. Фактичні витоки в спряженнях "золотник - корпус" гідророзподільників Р-80 при тиску 10 МПа (напрацювання 1000 мото-годин)

Номер	Вид розподільника			Втрати, см <sup>3</sup> /хв			
	Серійний	Відновлений	Зміцнений	До випробовувань		Після випробовувань	
				Факт.	Середнє	Факт.	Середнє
1	+	—	—	2,8	2,9	4,8	4,56
2	+	—	—	3,0		4,7	
3	+	—	—	2,9		4,2	
4	—	+	—	3,4	3,46	3,6	3,7
5	—	+	—	3,6		3,8	
6	—	+	—	3,4		3,7	
7	—	—	+	3,3	3,23	3,4	3,43
8	—	—	+	3,2		3,5	
9	—	—	+	3,2		3,4	



Таблиця 3.19. Фактичні витoki в спряженнях "золотник - корпус" гідророзподільників Р-80 при тиску 10 МПа (напрацювання 2000 мото-годин)

Номер	Вид розподільника			Втрати, см <sup>3</sup> /хв			
	Серійний	Відновлений	Зміцнений	До випробовувань		Після випробовувань	
				Факт.	Факт.	Факт.	Среднее
1	+	—	—	2,8	2,9	23,6	23,37
2	+	—	—	3,0		26,7	
3	+	—	—	2,9		19,8	
4	—	+	—	3,4	3,46	12,2	12,9
5	—	+	—	3,6		13,4	
6	—	+	—	3,4		13,1	
7	—	—	+	3,3	3,23	10,2	9,53
8	—	—	+	3,2		10,1	
9	—	—	+	3,2		8,3	

Таблиця 3.20. Мікротвердість покриттів, отриманих ЕІЛ сталі 45 перехідними металами та твердими сплавами.

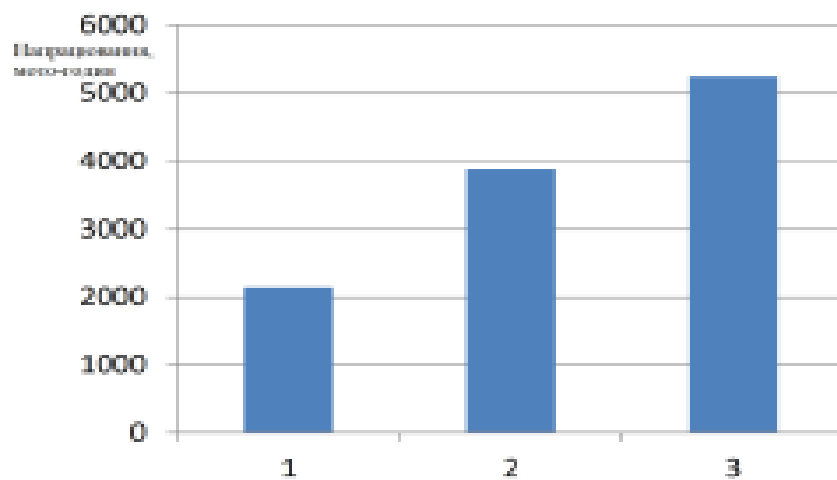
Мікротвердість ГПа	Матеріал покриття (анода)							
	Ti	Zr	V	Cr	Mo	W	T15K6	TN-20
	8,4	10,5	8,4	8,9	9,4	7,65	12	10,8

Легування підкладок із сталі тугоплавкими сполуками істотно підвищує твердість шару, що видно з прикладу карбідів. Дані мікротвердості покриття після ЕІЛ сталі 45 тугоплавкими карбідами представлені в таблиці 1.6 [51].

Таблиця 3.21. Мікротвердість покриття після ЕІЛ сталі 45 тугоплавкими карбідами

Мікротвердість, ГПа	TiC	ZrC	NbC	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C	WC
	30,4±1,0	26,5±1,8	16,6±0,8	16,0±1,0	14,0±0,5	32,0

Значення мікротвердості не однорідне за глибиною одержаного шару. Максимальне значення вона має у верхній зоні покриття (у білому шарі), і при переміщенні в глиб монотонно зменшується, поки не досягне значення твердості для основного матеріалу [14,51]. Між основним матеріалом та «білим шаром» формується перехідна зона (підшар), яка може надавати як позитивний, так і негативний вплив на якість поверхонь. Так, при зміцненні загартованої вуглецевої сталі, зона підшару є областю відпустки, отже, її твердість значно нижча, ніж твердість основного металу та поверхневого шару. Цей факт слід враховувати за необхідності обробки загартованих деталей [10, 51].



**Рис. 3.60.** Прогнозований наробіток (у мото-годинах): 1 – серійних розподільників, 2 – розподільники з відновленими золотниками, 3 – розподільники із зміцненими золотниками.



**Рис. 3.61.** Зовнішній вигляд (через мікроскоп) поверхні пояска золотника гідророзподільника після напрацювання 2000 мотогодин: а) серійного; б) зміцненого.

Збільшення товщини легованого шару призводить до різкого підвищення в ньому залишкової напруги, що призводить до виникнення на поверхні розділу значних зусиль, що призводять до виникнення тріщин.

**В покриттях зафіксовані тільки напруги, що розтягують, які не залежать від вмісту вуглецю в сталі.**

Найменша залишкова напруга в шарі (180–450 МПа) виникає при ЕІЛ металами, що утворюють із залізом тверді розчини (наприклад, V, Cr). Висока залишкова напруга, що виникає в шарі при легуванні титаном і цирконієм (600-1100 МПа), можна пояснити розігрівом поверхневих шарів до температур поліморфних перетворень [51]. Отже, при зміцненні деталей методом електроіскрового легування необхідно враховувати характер і величину залишкових напруг, що виникають у поверхневих шарах і проводити оптимізацію режимів (енергії розряду, тривалості легування, середовища міжелектродної) для кожного конкретного випадку, враховуючи при цьому особливості зміцнюваного матеріалу. Авторами [5, 51] виявлено, що електроіскрове легування знижує втомну міцність, з накопичення в одержуваному зміцнюючому шарі напруг, що розтягують. Висновки, представлені у роботі [51], констатують факт зниження втомної міцності сталі 45 ГОСТ 1050-88 після електроіскрового легування тугоплавкими сполуками (боридами і карбідами) до 22% [53]. виправити ситуацію дозволяє тільки подальша обробка пластичною деформацією, яка не тільки відновлює вихідну міцність втоми, але і дозволяє збільшувати її [58]. Шорсткість легованого шару становить чистових режимах 20–25 мкм, але в грубих – 80–160 мкм [58]. До недоліків методу електроіскрового легування можна віднести: малу товщину одержуваного шару ( $\leq 0,2$  мм); – низьку чистоту поверхні після обробки; – високу пористість; – щодо низьку продуктивність обробки (не більше 20 см<sup>2</sup>/хв); – немає можливості використовувати нетокопровідні матеріали [51].

## **4. ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИЙ ПРОЦЕС**

### **4.1. Модифікація поверхневого шару без зміни його геометрії.**

Це насамперед теплові, механічні, хімічні процеси, поєднання яких у єдиній комбінованій технології дозволяє надати деталям підвищених експлуатаційних характеристик. Останніми роками розроблено новий спосіб [76] зміцнення ріжучого інструменту серед рідкого азоту. Проведені останні десятиліття дослідження показали, що вирішення проблеми відбувається шляхом проведення досліджень у напрямку отримання необхідних експлуатаційних характеристик виробів без видалення припуску з цілеспрямованим комбінованим впливом на поверхневий шар. У сучасному машинобудуванні як матеріали для інструменту при металообробці використовуються, переважно, спеціальні (зокрема тверді) сплави.

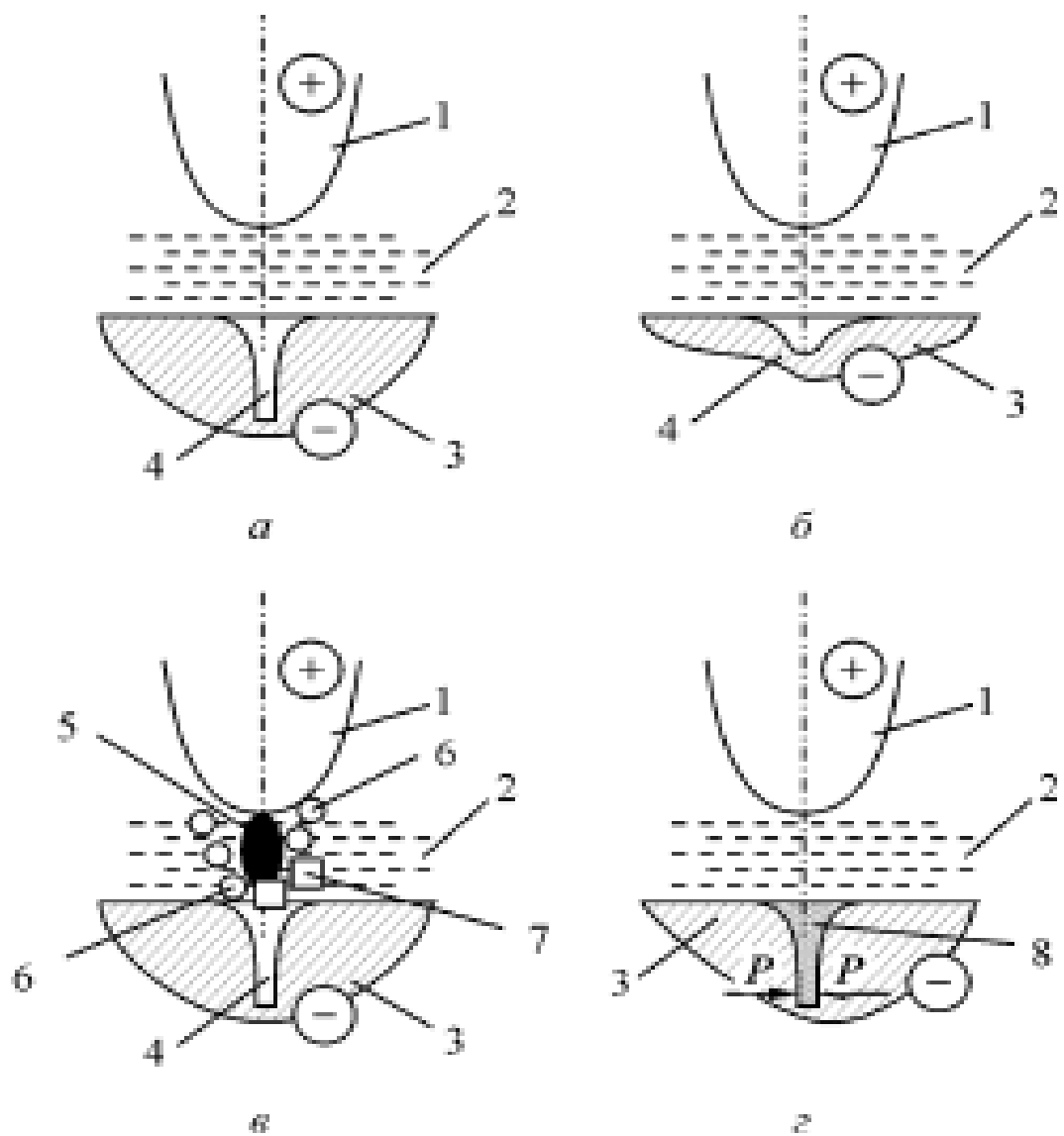
З підвищенням міцності оброблюваного матеріалу зносостійкість і шорсткість робочої кромки ріжучого інструменту сильно впливає на параметри та режими обробки, що викликає необхідність знижувати товщину шару, що зміцнює, до десятків мікрометрів, а це помітно зменшує стійкість інструменту. Зміцнення матеріалу може поєднуватися з легуванням поверхні шаром нітриду титану, який утворюється в місці розрядів при високих градієнтах температур. Це наведено в [69], де нітрид титану створює зносостійкі покриття, які розміщуються в мікротріщинах, що утворюються при попередній обробці, і можуть бути відсутні на поверхні ділянки після зміцнення деталі.

У [75] показано, що у нев'язких матеріалів поверхневому шарі мікрошліфів спостерігаються після попередніх операцій поглиблення у формі термічних мікротріщин, що виникають через мікророзтравлення по межах зерен при електрохімічній обробці, у разі розривів матеріалу при механічній обробці. Ширина і довжина заглиблень може бути від кількох мікрометрів до часток міліметра. Ці дефекти впливають на якість матеріалів та їх характеристики міцності в процесі експлуатації виробів (особливо на витривалість при багатоциклових навантаженнях).

Механізм криогенно-ерозійного зміцнення розкритий та описаний у роботі [82], де процес відбувається в середовищі рідкого азоту, що подається шляхом поливу в зону зміцнення. Анод має форму загостреного стрижня, виготовленого з марок чистого титану або титанових сплавів. Електроди 1 і 3 (заготівля) встановлюють положення, наведене на рис. 4.1, а після чого подають рідкий азот 2 на ділянку з мікропоглибленнями 4. За рахунок цього поверхневий шар заготовки охолоджується до низької температури, і мікропоглиблення, що мають розкриття до  $1\div 5$  мкм, стискаються, як представлено на рис. 4.1 б. На рис. 4.1, наведено процес утворення розряду, тривалість якого може бути від 0,5 мкс до 0,3 мс. Тоді густина енергії імпульсу досягає  $105\div 108$  Дж/мм<sup>2</sup>. Цей показник співмірний з питомою потужністю лазера.

Місце обробки інтенсивно нагрівається за рахунок енергії розряду, на аноді відбувається утворення розплаву і плазми, і в міжелектродний простір викидаються мікрочастинки розплавленого титану 7. За рахунок розряду рідкий азот випаровується, утворюється іонний потік, за рахунок цього мікророзшарування різко розкривається, створюючи насосний ефект, при якому частинки азоту та титану втягуються в мікропоглиблення та щільно його заповнюють. У поглибленні за високої температури утворюється нітрид титану 8, який впроваджується в стінки мікропоглиблення.

Після припинення дії імпульсу розряду холодний рідкий азот закриває мікропоглиблення з нітридом титану. При охолодженні виникають сили стиснення, які прискорюють дифузію нітриду титану до стінок мікропоглиблення. В результаті утворюється високотверда монолітна структура з високими експлуатаційними властивостями, у якій відсутні концентратори напруги у формі мікрodefektів від попередніх операцій.



**Рис. 4.1.** Послідовність усунення мікротріщин нітридом титану, що утворився: а - вихідне положення; б – заключна частина процесу стабілізації теплового режиму; в – при проходженні імпульсу струму (розряду); г – наприкінці охолодження ділянки під розрядом; 1 – інструмент-анод; 2 - азот у рідкому стані; 3 – заготівля-катод; 4 – мікропоглиблення; 5 – місце розряду; 6 - іонізований азот у газоподібному стані; 7 - частинки титанового матеріалу з інструменту-аноде; 8 - нітрид титану, що заповнює мікротріщину.

Утворення нітридів відбувається при температурі більше 1000 К. Сталі мають температуру плавлення близько 1700÷1800 К. Ці відомості дозволяють розрахувати необхідну для протікання процесу енергію імпульсу та режими обробки для деталей з відомими формами мікропоглиблень та розташуванням їх



у поверхню . Процес налаштування та налагодження виконують до досягнення стабільного температурного та електричного режимів, які при зміцненні використовують як робочі. Перетин каналу розряду визначає геометрію та похибку ділянки покриття, яка перед початком обробки рідким азотом, як правило, не перевищує 25 мкм [78]. Це в 4 рази менше розміру при формуванні каналу розряду при напрузі 100 з прийнятими електричними режимами при обробці в дистильованій воді. Процес протікає при високій концентрації енергії, що дозволяє сформувати тверду вставку з нітриду титану, що потрапляє в мікропоглиблення, що забезпечує їхнє застигання в холодній зоні шляхом тепловідведення від місця розряду. У процесі зміцнення в рідкому азоті в мікротріщинах і на поверхні не спостерігається поява слабо пов'язаних з деталлю частинок, що переносяться з анода.

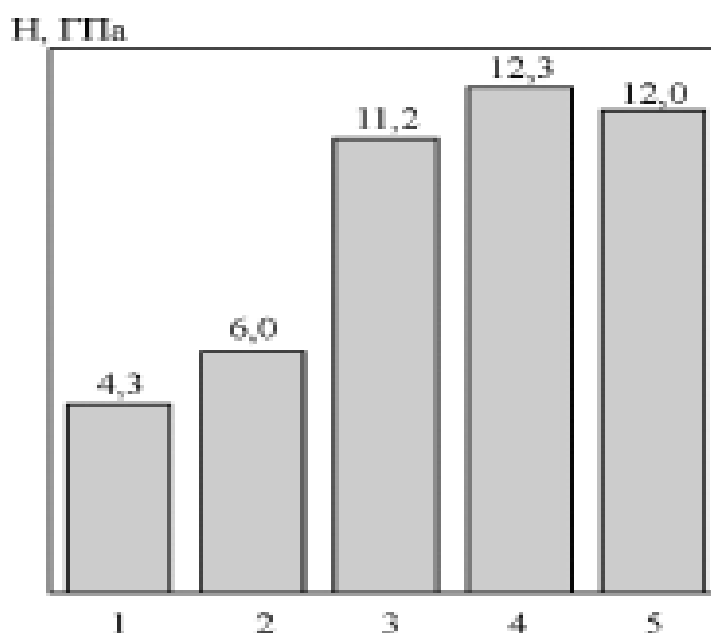
#### **4.2. Покриття електроерозійним методом шарами макротовщини.**

Процеси з нарощуванням шарів із матеріалів з особливими властивостями та монолітною структурою забезпечують підвищення експлуатаційних властивостей шляхом перенесення на деталь (у тому числі з інших видів матеріалів) необхідних характеристик (зносостійкість, жаростійкість та ін.) до виробу через параметри покриття, що наноситься. Типовим представником такої технології є електроерозійне легування [78, 73, 82], яке останніми роками склало основу технології відновлення геометрії деталей з нарощуванням шарів товщиною 1 і більше мм. Отримані результати дають підстави стверджувати, що запропонований процес стає затребуваною частиною технології прототипування, де досягається принципово новий результат, який усуває основний недолік такої технології – нестабільність характеристик міцності. Тут після покриття властивості базової деталі не порушуються і відбувається підвищення міцності після нанесення поверхневого шару за рахунок обґрунтованого застосування керованих комбінованих процесів з накладенням електричного поля. При нанесенні чавунних або сталевих покриттів електроерозійним методом у разі одного шару із граничною до 0,3 мм вдається забезпечити хорошу рівномірність

розташування крапель. За дотримання таких умов вдається встановити мінімальний припуск та величину модифікованого шару, в якому протікають дифузійні теплові процеси. При цьому слід враховувати, що в разі отримання покриття «чавун сталі» можливе науглерожування, в процесі покриття сталі стали можуть виникати термічні зміни, і т.д. Товщина шару покриття може змінюватися в діапазоні  $\pm 20\%$ , тому при збільшенні розміру шару припуск на вирівнювання зростає, і може досягати 50% його товщини для покриття сталі по сталі. Якщо покриття виготовлене з чавуну, то виходить поверхня більш рівна, ніж при використанні сталі. Останнє можна пояснити підвищеною рідиною. Нанесення наступних шарів покриттів потрібно виконувати в поглибленнях між краплями попередніх шарів, але в умовах проходження високочастотних імпульсів досягти цього не вдається. Зайве збільшення товщини шару покриття, що наноситься призводить до вторинного видалення вже нанесених шарів або їх частини, що знижує можливість досягнення їх кінцевої підвищеної товщини і збільшує час і вартість обробки. З літератури [75, 78 та ін] відомо, що відбілений чавун утворюється при підвищеному вмісті вуглецю і високій температурі нагрівання матеріалу. У процесі розряду межі лунки відбувається утворення плазми з температурою до 3000÷4000 До, що достатньо переходу сірого чавуну в білий. Якісне чавунне покриття зазвичай має товщину до 0,4÷0,5 мм. При чавунній заготівлі із вмістом вуглецю 2,5÷2,6 % після нанесення покриття цей показник у поверхневому шарі досягає 2,7÷2,8 %, що спричиняє накопичення вуглецю, що сприяє утворенню вибіленої зони. Результати досліджень зразків з нанесеним шаром чавуну або сталі показали, що підвищена товщина якісного покриття досягається при формуванні декількох шарів сталі та чавуну. При цьому поверхневим шаром, як правило, повинен стати чавун, що викликає необхідність вибору енергії імпульсу, що забезпечує отримання якісного чавунного покриття в кінці операції.

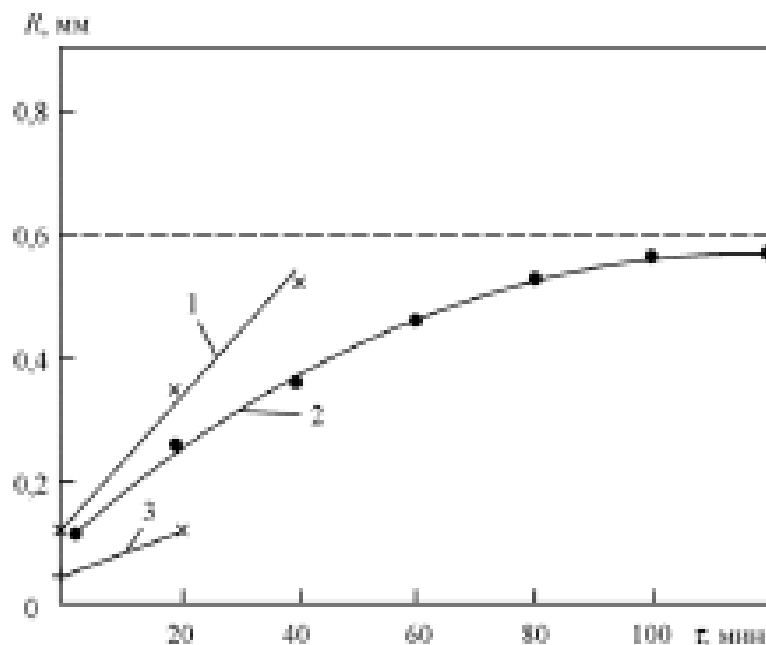
### 4.3. Електроерозійне зміцнення серед рідких газів.

Дослідження стійкості фрез із сталі P18 та твердого сплаву T15K6, призначених для прорізування вузьких ( $0,8 \div 1,2$  мм) пазів у деталях із бронзи БрХ0,7, показали, що характеристики міцності та експлуатаційні матеріали у вихідному стані значно відрізняються від характеристик матеріалів після зміцнення серед рідкого азоту. При необхідності зміцнення ділянки заготовлі з чітко заданими межами переміщення інструмента-анода керується за допомогою програми, яка вводиться в установку з креслення деталі (такі програми передбачені, наприклад, в установці ЕЛФА-731). Наведена на рис. 4.2 крива зміни мікротвердості поверхневого шару для металів показує, що у вуглецевої сталі У10А після шліфування та загартування формується мікроповерхня з мікротвердістю 4,3 ГПа, а потім у процесі зміцнення сплавом ОТ4-1 в рідкому азоті мікротвердість збільшується до  $1,4 \div 1,5$  разів, що видно на рис. 4.2, кривий 1, 2. Звідси випливає, що на зміцненій поверхні величина мікротвердості досягає показника, близького до мікротвердості твердого сплаву (див. 3 на рис. 4.2).



**Рис. 4.2.** Показники мікротвердості вуглецевої сталі У10А (стовпці 1-3) та твердого сплаву ВК6 (стовпці 4, 5). Використовувані режими обробки: 1 – термічна обробка; 2, 3 – показники після зміцнення в рідкому азоті при вимірі на глибині  $40 \div 60$  мкм та на зміцненій поверхні; 4 – без застосування зміцнення; 5 – із зміцненням у рідкому азоті.

Зміцнення аналізованим способом твердого сплаву ВК6 не дало позитивного ефекту (показники 4, 5 наведено на рис. 4.2), т.к. внаслідок дії високих градієнтів температур у зоні мікророзрядів у процесі зміцнення на поверхні сплаву виникали мікротріщини. На рис. 4.3 наведено зміни у процесі обробки радіуса заокруглення ріжучої кромки металевого інструменту. Допустима величина зносу кромки становить близько 0,6 мм (штрихова лінія). Без зміцнення поверхневого шару з використанням рідкого азоту отримана стійкість фрез із сталі P18 до переточування не більше 40÷45 хв. Після зміцнення зазначеним методом значно знизився зношування кромки, а радіус її округлення через 40 хв роботи становив не більше 0,37 мм. Тоді загальна працездатність фрез зросла до 80÷90 хв, тобто стійкість зросла 2,5 разу. Поліпшилась якість оброблених деталей. Так, за рахунок збереження геометрії загострення кромки, усунуто пошкодження пазів, що раніше призводило до шлюбу виробів. Крім того, знизилася висота мікронерівності на поверхні з  $Ra = 5$  мкм до  $Ra = 3,2\div 4$  мкм, покращилася стабільність розмірів, за рахунок чого похибка зменшилася з 0,15 до 0,05 мм.



**Рис. 4.3.** Радіус заокруглення ріжучої кромки фрез, виготовлених із сталі P18 (1, 2) та твердого сплаву Т15К6 (3) протягом часу експлуатації інструменту: 1 - без зміцнення; 2, 3 – із зміцненням у рідкому азоті.

Пунктиром показано гранично допустиму зміну радіусу внаслідок зносу інструменту. Результати зміцнення твёрдосплавного інструменту при роботі на тих же технологічних операціях показали, що високі перепади температур, спричинені дією розрядів, можуть викликати розтріскування та фарбування кромки. Це відбувається відразу після початку експлуатації інструменту, тому в даний час зміцнення ріжучих кромок з твердих сплавів електроерозійним методом серед рідких газів недоцільно, хоча є передумови усунення цієї перешкоди. Провели дослідження технології зміцнення в рідкому азоті медичного інструменту. Досягнуто підвищення його стійкості до 10÷12 разів та усунення мікродфектів у формі локальних розтріскування, у яких мікроби могли зберігатися при стерилізації, що призводило до необхідності використання одноразового інструментарію та вимагало додаткових витрат на його придбання. Як відомо, необхідність використання хірургії одноразового інструменту багаторазово підвищує вартість лікування пацієнтів. Можливість багаторазового використання в медицині дорогого інструменту та використання методу зміцнення дозволяє виключити перенесення хвороботворних мікробів.

#### **4.4. Технологічний процес модифікації поверхневого шару без видалення припуску.**

При експлуатації технологічного оснащення для електрохімічної обробки частина її елементів служить для підведення електричного струму до заготівлі і може активно розчинятися, що викликає прискорену втрату настановних баз та необхідність ремонту або заміни оснастки. Складність вирішення проблеми полягає в тому, що більшість металевих захисних покриттів схильні до анодного розчинення, а діелектричні матеріали, що наносяться, не забезпечують підведення технологічного струму. Дослідження модифікації властивостей поверхневого шару виконували за принципом корисності з метою забезпечення необхідного головного (генерального) експлуатаційного показника підвищення стійкості та ресурсу на прикладах використання комбінованих методів обробки. При освоєнні нових конструкцій авіаційних двигунів алюмінієві лопатки компресора почали

замінювати на деталі титанових сплавів. Основним методом обробки пера цих деталей залишився електрохімічний процес двосторонньої обробки. У нових виробках використовуються лопатки підвищеної довжини із зменшеним перерізом (рис. 4.4). Заміна матеріалу та зміна розмірів деталі збільшили електричний опір при підведенні до заготівлі технологічного струму і викликали необхідність підвищення напруги з 12-18 до 30-36 В. Це призвело у технологічного оснащення (контейнерів з струмопідведення) до підвищеного зносу базових поверхонь, що знижують встановлений термін служби та період працездатності технологічного оснащення.



**Рис. 4.4.** Лопатки турбореактивного двигуна із титанових сплавів.

На етапі відпрацювання виробничої технологічності за принципом корисності та булевим змінним були проаналізовані раніше застосовувані способи підвищення стійкості оснастки. Розглянуто 6 допустимих рішень R і 4 варіанти технологічних рішень T для модифікації властивостей поверхневого шару оснастки без зміни розмірів базових поверхонь: хіміко-термічний спосіб азотування; покриття поверхні хромом (напилення), кадмієм, цинком (гальваніка); заміна матеріалу на металеві та композиційні марки, що мають високу стійкість до анодного розчинення. Критеріальний аналіз дозволив відразу ж відхилити частину



способів: азотування через високу температуру нагрівання і короблення контейнера, значних витрат на операцію, що показало  $\bar{K}_{op} = 1,9$ , що викликало неприпустиме підвищення собівартості продукції покриття не забезпечили заданого  $\Pi$ , а використання мідно-графітових композицій зажадало підвищення напруги струму, що перевищує допустиму межу. За аналогією зі стандартною оцінкою корозійної стійкості матеріалів (процеси корозії та анодного розчинення мають близьку природу) за критеріями принципу корисності була встановлена доцільність використання контейнерів і струмопідводів титанових сплавів, що раніше застосовувалися для виготовлення аналогічного оснащення. Було оцінено збільшення вартості виготовлення, вартості матеріалу на контейнер та струмопідведення, доступність та освоєність процесів обробки матеріалів оснастки. При заданому  $\Pi = 19 \div 21$  години виконані розрахунки, які показали, що найменші значення мають сплави ОТ4-1 та ВТЗ-1. Була проведена обробка зразків із сплавів, що використовуються для титанових лопаток (рис. 4.4), та встановлена швидкість зношування базових поверхонь оснастки.

Для досягнення необхідного терміну служби оснастки ( $\Pi_{01} = 600$  годин) був обраний спосіб комбінованої хіміко-магнітної обробки, який дозволяє у слабких магнітних полях отримати пасивовану поверхню, що забезпечує подачу необхідного для обробки лопаток технологічного струму при мінімальному зносі базових поверхонь. Обґрунтовано та експериментально підтверджено нові параметри режимів: ступінь забрудненості використовуваного робочого середовища продуктами обробки  $4,5 \div 5\%$  (за обсягом), величина зазору між електродами при пасивації  $3 \div 3,5$  мм, напруга  $10 \div 16$  В; робоче середовище –  $15\%$  розчин хлористого натрію із температурою  $18 \div 24$  °С. Диференціальна зміна сили струму в імпульсі при діапазоні міжелектродних зазорів не більше  $12\%$ , що забезпечує гарантоване отримання поверхневого шару, що створює захист від анодного розчинення. При проектуванні ТП застосовано механізм адаптації управління процесом сигналу зворотного зв'язку від зміненого міжелектродного зазору з компенсацією зміни сили технологічного струму за величиною напруги на електродах. Запропонований спосіб здійснювався на верстатах для

електрохімічної обробки без перестановки технологічного оснащення, при проектуванні блоку модифікації установки пасивації оснастки був використаний раніше створений спосіб для забезпечення необхідного циклу подачі робочого середовища. Це дозволило мінімізувати збільшення собівартості операції за рахунок додаткових витрат на виконання операції та модернізацію обладнання, що не перевищує 10%, що вкладається у допустимий показник виробничої технологічності. Аналогічна проблема має місце під час виготовлення стяжних стрічок лопатей вертольотів (рис. 4.5).



**Рис. 4.5.** Стяжні стрічки: а – заготівля для електрохімічної розмірної обробки; б – деталь після обробки полотна деталі.

Як приклад об'єкта досліджень на рис. 4.5 показані стяжні місця стрічки лопатей гелікоптерів важкого класу, що мають площу обробки, близьку до площі розглянутих титанових лопаток. Оброблювана деталь виготовлена із сталі 18ХНВА, похибка  $\pm 0,05\text{мм}$ , шорсткість її поверхні  $R_a=0,63\text{мкм}$ . Напруга на електродах підвищена з 12 до 18 ст.

В особливо складних умовах працюють турбонасосні агрегати (ТНА) ракетних двигунів (рис. 4.6 а), де поряд з високими механічними впливами є високий перепад температур, наявність агресивних середовищ. Робочі колеса (рис. 6.17 б) зазвичай виконуються цільними із зазором між лопатками в кілька міліметрів, що обмежує доступ інструменту. Тут стан поверхневого шару визначає важливу можливість створення сучасних двигунів.



а)



б)

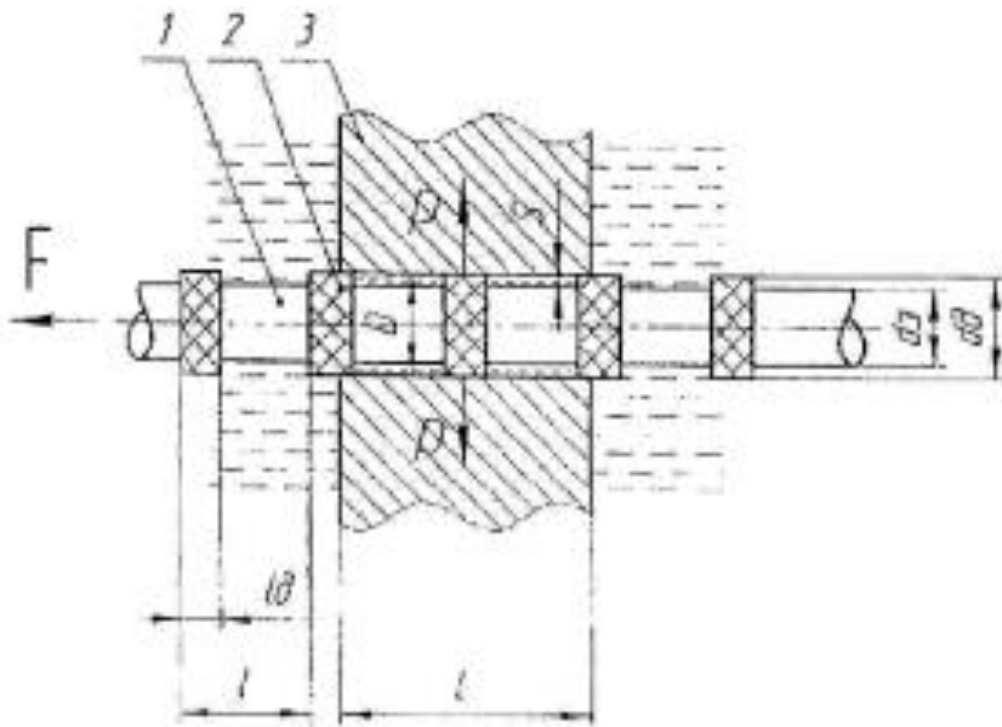
**Рис. 4.6.** Турбонасосний агрегат ракетного двигуна (а) та деталі ТНА з лопатками (б).

У зв'язку зі створенням ракетних двигунів багаторазового використання потрібно збільшити термін напрацювання (ресурс) лопаток турбіни і турбонасосного агрегату з 119 до 240 секунд, що викликає необхідність або зниження температури перед турбіною (а отже і зниження тяги виробу), або створення поверхневого шару з більшою термо . Перший варіант небажаний, т.к. він різко погіршує всі експлуатаційні показники виробу та робить його неконкурентоспроможним. Перед технологами поставлено завдання підвищити жаростійкість лопаток без погіршення інших показників (наприклад, шорсткості покриттів). Для збільшення ресурсу лопаток та ТНА було запропоновано нанесення нових термостійких покриттів. Досліджено спосіб комбінованої

обробки, в якому за запропонованою методологією створена ефективна технологія нанесення багат шарових покриттів на лопатки ТНА, де використовується електроерозійне покриття з жаростійких, а поверхня вирівнюється променевим методом.

Пріоритетним методом отримання проточного тракту форсунок є електроерозійна та комбінована ерозійно-хімічна прошивка, досить повно висвітлена [82]. Використання цього методу заважає мала швидкість подачі інструменту (при глибині прошивки більше 5 діаметрів подача не перевищує 0,2 мм/хв). Для отворів з невеликою площею перерізу основним обмеженням продуктивності є скрутний масовинос продуктів із зони обробки. Для усунення цього обмеження були розроблені нові способи та пристрої, де інтенсифікація процесу масовиносу досягається за рахунок імпульсного векторного впливу на продукти обробки в бічному міжелектродному зазорі та застосування проточного тракту з розширенням його для витікання забрудненого робочого середовища із зазору. При виготовленні отвору на вході струменя виходить форма реактивного сопла, що значно прискорює потік і дає збільшення витрати робочого середовища. Якщо отвори у форсунці не забезпечують заданої витрати, то їх у процесі доведення розширюють електрохімічним методом, що дозволяє знизити шорсткість (підвищити витрату пального, що протікає через отвір). Якщо цього недостатньо, то збільшують час обробки і тим самим розширюють канал. Технологічні режими процесу для схеми електрохімічної розмірної обробки, що застосовується в цьому випадку, наведені в [79]. Значно складніше знизити розмір отвору малого перерізу в проточній частині форсунки, зберігши при цьому потрібну якість поверхневого шару. Для отворів діаметром менше 1 мм застосовували для цього методи гальванічних покриттів через утрудненого масопереносу нездійсненні, і вже виготовлені форсунки на стадії випробувань при завищеному перерізі хоча б одного каналу відбраковувалися. Для отримання якісного поверхневого шару та зменшення площі прохідного отвору у форсунках в останні роки розроблено новий спосіб комбінованого електроосадження (наприклад, хрому) у каналах малого перерізу. Процес комбінованої обробки таких отворів полягає у поєднанні

гальванічного осадження (хромування) з одночасною механічною обробкою шарів осаду, що ростуть. У загальному випадку технологія доведення [79] включає нанесення на внутрішню поверхню каналу форсунки покриття інструментом (рис. 4.7), в якому робоча частина являє собою електрод (дрот) із встановленими на ньому дорнами (зміцнюючими поясками).



**Рис. 4.7.** Доведення отвору у форсунці шляхом гальваномеханічного нанесення шару хрому.

Технологія включає такі етапи:

1. Перший етап включає осадження шару покриття до механічного впливу. Для отримання якісного покриття потрібно розрахувати діаметр електрода так, щоб забезпечити міжелектродний зазор, що гарантує усунення короткого замикання, та розміщення між поясками робочого середовища – електроліту в об'ємі, необхідному для протікання процесу. Крім того, для заданого діаметра необхідно зробити розрахунок значення граничної густини струму, що не руйнує структуру матеріалу.

2. Далі відбувається тиск дорну на зовнішній шар покриття, яке розраховують без урахування динамічного впливу притирів для конкретних розмірів кожного

перерізу отвору. Діаметр першого дорну розраховують з урахуванням сили механічної дії.

3. Формування другого шару покриття відбувається за механізмом звичайного електролітичного осадження з урахуванням того, що міжелектродний проміжок після нанесення першого шару зменшується в радіальному напрямку на величину одиничного шару покриття, але його значення на різних ділянках по глибині отвору залишається постійним після проходження дорну. Потрібно підібрати міцність дроту, що працює при силі натягу з урахуванням заданого значення тиску. Швидкість поздовжнього переміщення електрода-інструменту (ЕІ) необхідно зв'язати з об'ємом активного електроліту, що знаходиться в просторі між дротом, поверхнею отвору та дорнами, який повинен забезпечувати перебіг реакції осадження шару хрому на поверхню отвору.

4. Потім виконується друга механічна дія наступним дорном. При цьому слід враховувати, що з нарощуванням шарів опір руху дроту зростає, оскільки діаметр отвору зменшується на величину подвійного шару покриття. Тому необхідно регулювати силу згідно із законом (тут – швидкість поздовжньої подачі ЕІ). Зміна розмірів перерізу дорнів по довжині розраховується з урахуванням величини одиничного шару покриття, що дає величину розрахункового натягу протягом усього періоду обробки.

5. Подібним чином утворюються наступні шари до одержання всього покриття в отворі із зменшеним до необхідної величини розміром перерізу. З наведеного опису способу [72,82] видно, що для здійснення та управління процесом гальваномеханічного хромування (ГМХ) отвори електроду-інструменту (ЕІ) потрібно надати постійну швидкість поздовжньої подачі, яка може бути

$$v_{\text{ш}} = \frac{l_i}{\tau_i} = \text{const}, \quad (4.1)$$

визначена за формулою:

де  $l_i$  - Довжина  $i$ -го ланки ЕІ;

$\tau_i$  – тривалість утворення шару покриття  $i$ -ю ланкою ЕІ, хв.

Тривалість утворення шару покриття  $i$ -м ланкою ЕІ залежить від ширини відкритої ділянки та швидкості осадження. Величину швидкості осадження в

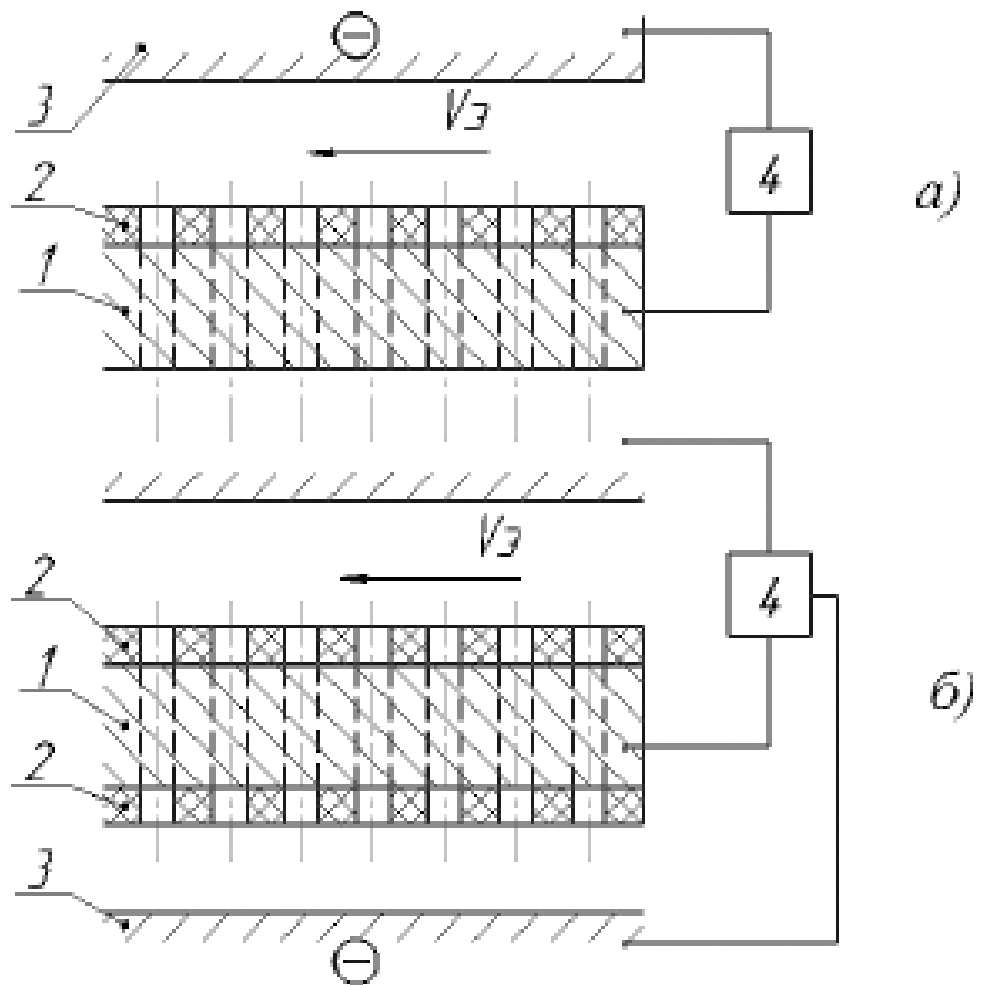


межах кожної ланки визначають ділянки з найменшою щільністю струму. Для отримання рівномірного покриття по товщині в межах ланки, кожен шар покриття згладжується дорном. Розрахунок ширини дорнів виконують з урахуванням умов збереження міцності та необхідної величини адгезії. Тоді діаметр першого дорну розраховують при граничній силі механічного впливу, а величину підйому діаметру дорну ( $V_i$ ) для кожної з наступних ділянок EI знаходиться з урахуванням нанесення шару для наступного етапу покриття при збереженні необхідного натягу, причому повинна виконуватися умова  $V_i = \text{const} \geq 0$ . Вимірювання показали, що товщина покриття може забезпечити зниження діаметра отвору до 50 мкм. Контроль деталей після доведення виявив, що покриття не має сітки мікротріщин. Це відповідає вимогам до отворів у форсунках. Розрахунки, проведені за наведеною методикою, дали результати, близькі до експериментальних (похибка була в межах 7%).

#### **4.5. Усунення поверхневих дефектів у каналах цілісних фільтрів.**

Якість проточної частини фільтрів визначає технічні можливості двигунів літальних апаратів та різних теплових машин. Традиційні технології виготовлення отворів у фільтрах, що застосовуються в даний час, або малопродуктивні (наприклад, механічне свердління), або не забезпечують необхідної якості (наприклад, пробивання, електроннопроменева прошивка). Застосування електричних методів обробки дає можливість отримати високі показники поверхневого шару, стабільну витрату рідкого та газоподібного середовища, точність, розширюють технологічні можливості процесу, але мають малу продуктивність (при прошивці одним електродом). Тому зниження часу виготовлення отворів за рахунок багатоелектродної (групової) обробки дозволяє не лише прискорити запуск у виробництво нових виробів, а й знизити витрати на виконання операцій з використанням дорогого обладнання електричних методів обробки. При цьому відкривається можливість отримувати отвори будь-якого (у тому числі багатокутного) перерізу, що дозволяє значно підвищити здатність фільтруючого фільтрів і за рахунок цього знизити їх габарити, зменшити масу

деталей, знизити вплив вібрації виробу на характеристики міцності матеріалу виробів. Застосування замість променевої обробки групової електроерозійної прошивки, де використовуються технологічні можливості багатоелектродної обробки отворів у металевих листових матеріалах різної товщини, дозволяє повністю виключити появу на поверхні заготовлі слабо пов'язаних з матеріалом деталі крапель металу, що представляють об'єкт підвищеної уваги при отриманні працездатних виробів. створено нові методи обробки для групового виготовлення отворів різного перерізу у фільтрах. Для виробів з листа товщиною понад  $0,3 \div 0,5$  мм розроблені нові (на рівні винаходів) способи та створений інструмент, якість поверхневого шару при багатоелектродній електроерозійній та комбінованій прошивці отворів. На рис. 4.8 наведено нову технологію комбінованого виготовлення отворів для фільтрів у тонколистових заготовках методом групової обробки отворів, що потрібно для фільтрів, що використовуються в сучасних літальних апаратах. Геометрія перерізів та кількість отворів у заготовлі 1 (рис. 4.8) визначається шаблоном 2, який наноситься, наприклад, фотохімічним методом до початку обробки отворів. Формування отворів виконується анодним розчиненням під дією струму, що подається від джерела живлення 4 на електрод 3 і заготовку 1. При односторонньому шаблоні (див. рис. 4.8 а) глибина одержуваних якісних отворів становить до  $0,3 \div 0,5$  мм (залежить від марки та стану матеріалу заготовлі, технічні вимоги до деталі та ін.). При необхідності отримання отворів більшої глибини (до 1 мм) шаблони встановлюють із двох сторін (рис. 4.8, б). Швидкість прокачування електроліту ( $V_e$ ) розраховується в залежності від кількості отворів, що одночасно виготовляються, і зазвичай значно нижче, ніж при прошивці каналів багатоелектродним інструментом.



**Рис. 4.8.** Схема електрохімічного одержання отворів у тонких металевих фільтрах: а) при односторонній обробці; б) при двосторонній обробці; 1 тонколистова заготівля, 2 - діелектричний шаблон, 3 - електрод, 4 - джерело живлення струмом,  $V_e$  - швидкість прокачування електроліту.

Технологія виготовлення отворів включає такі етапи:

1. Розраховують діаметр (для круглих) отворів у шаблоні. Тут враховується розширення каналу з боку шаблону, на розміри якого впливає радіус заокруглення на початку отвору, товщина заготовки ( $h_1$  або  $h_2$ ), міжелектродний зазор ( $s$ ), товщина шаблону ( $t_{ш}$ ). Тут формування отворів у фільтрі відбувається під дією локального електричного поля, межі якого на заготовці 1 визначаються діелектричним шаблоном 2, впритул нанесеному на одну або обидві поверхні заготовки (рис. 4.8). Шаблон замінює профільні електроди, і кількість отворів довільного перерізу, що одночасно виготовляються, обмежена тільки розмірами

шаблону. Якщо заготівля має малу товщину, порівнянну з товщиною шаблону ( $h_1$ ), то здатність виробів, що фільтрує, може знижуватися через утворення під шаблоном «поширення» з радіусом округлення і необхідністю збільшення кроку між сусідніми отворами. Похибка отвору зростає із збільшенням міжелектродного зазору  $s$ . У разі значної (в межах допустимого значення) товщини заготовки «поширення» практично не впливає на характеристики фільтра, але кінчна ділянка, що утворилася, знижує діаметр отвору до  $d$ . При використанні заготовок товщиною  $h_1$  крок між отворами у шаблоні необхідно збільшувати на

$$L_{III} = K_1 h_1, \quad (4.2)$$

де  $K_1$  - коефіцієнт, що змінюється від 0,2 до 0,1.

Якщо товщина заготовки  $h_2$  можна приймати постійним, рівним 0,1. Мінімальна відстань між сусідніми отворами у шаблоні ( $L_1$ ) вибирають з урахуванням вимог креслення деталі та залежно від «поширення» так, щоб між ними залишалася перемичка ( $L$ ), достатня для збереження міцності фільтра (зазвичай не менше 0,1 мм)

$$L_1 = 2L + l. \quad (4.3)$$

2. Проектують у масштабі креслення шаблону та створюють його негатив.
3. Фотохімічним (або аналогічним методом) наносять на одну або обидві (рис. 4.8) сторони заготівлі в потрібному масштабі креслення шаблону.
4. Виготовляють отвори в тонкостінних фільтрах за схемою, показаною на рис. 4.8 на режимах, наведених у табл. 4.1. Для фільтрів, що виготовляються, похибка не перевищує 0,1 мм при шорсткості поверхні отворів 0,32 мкм. Час виготовлення фільтра з 4000 отворів у заготовці товщиною 0,08 мм не перевищує 1,2 хвилини.

Таблиця 4.1. Технологічні режими електрохімічної групової прошивки отворів

Розмір робочої частини фільтру, мм	h, мм	S, мм	напруга на електро- дах, В	V <sub>г</sub> , м/с	Примітка
до 20	до 0,2	0,1÷0,2	6÷8	1÷2	Одностороння прошивка
	0,2÷0,4	0,15÷0,2	8÷10	2÷3	Двостороння обробка
	0,4÷1,0	0,2÷0,3	10÷12	2÷3	
20÷50	до 0,2	0,2÷0,25	8÷10	2÷3	Одностороння прошивка
	0,2÷0,4	0,02÷0,3	10÷12	2÷3	Двостороння обробка
	0,4÷1,0		12÷15	3÷4	
Свыше 5050	до 0,2	0,25÷0,3	10÷12	2÷3	Одностороння прошивка
	0,2÷0,4	0,3÷0,4	12÷15	2÷4	Двостороння обробка
	0,4÷1,0	0,4÷0,5	12÷15	3÷4	

Для інтенсивної прошивки в товстостінних металевих фільтрах отворів малого діаметра та отримання виробів без утворення на їх поверхні місцевих включень потрібні електроди-інструменти, які не мають внутрішніх каналів для підведення робочого середовища в зону обробки. При груповій прошивці отворів, наприклад, у фільтрах, відстань між ними стає настільки малим, що сусідні електроди можуть бути виконані тільки спільно з корпусом і їх обертання стає неможливим. Найбільш технологічні інструменти, де переріз кожного електрода є прямокутником, хоча у фільтрах потрібно отримати, в основному, круглі отвори. Електричні методи обробки дозволяють прошивати канали будь-якого перерізу, у тому числі з великою кількістю електродів, що одночасно працюють (груповий метод) [78] показана можливість виготовлення групи якісних отворів діаметром 0,2÷0,5 мм, глибиною до 20 мм, де використовують інструмент з металевих трубчастих електродів, через які подають робоче середовище до торця

інструменту. При монолітному інструменті такої можливості немає, тому рідину пропускають через вузькі щілини між електродами вздовж їх зовнішньої поверхні. Тут при поглибленні електродів в заготовлю вхідні та вихідні потоки робочого середовища зустрічаються на бічних ділянках виготовлених отворів, ускладнюючи винесення продуктів обробки та знижуючи швидкість процесу. Для електроерозійної та комбінованої обробки групою електродів, де неможливо сформувати наскрізне протікання робочого середовища, найбільш технологічним стає цілісний інструмент з великої кількості розміщених електродів.

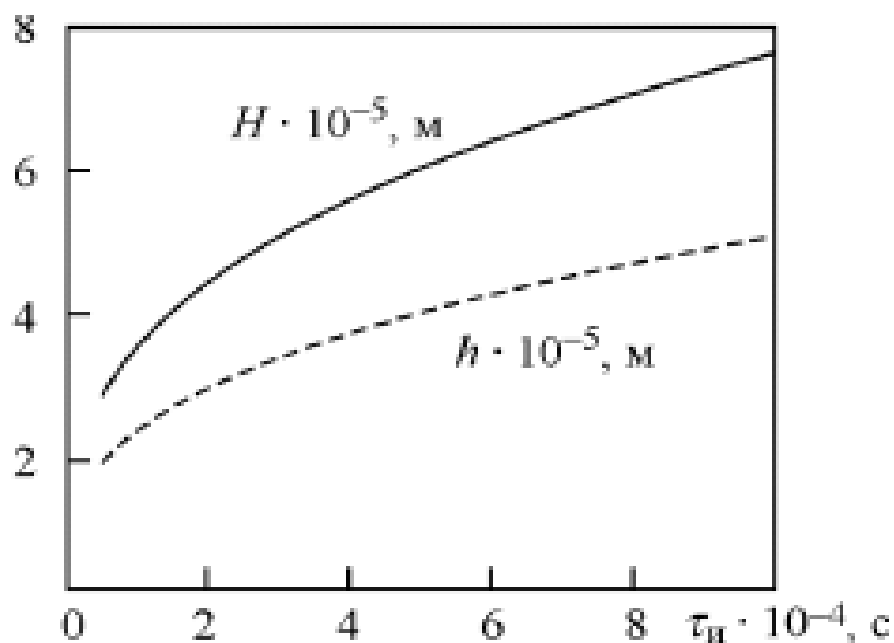
#### **4.6. Проектування процесів удосконалення поверхневого шару при ремонті та відновленні експлуатаційних властивостей виробів.**

При видаленні мікронерівності покриттів може знижуватися до 50% товщина нанесеного шару. Якщо потрібне збереження площі опорної поверхні в діапазоні хоча б 50 % від загальної площі сполучення, припуск слід передбачити в 2÷3 рази більше, ніж висота нерівностей. Це збільшує можливості методу досягнення більшої товщини якісного шару. Для чавунного покриття склад шарів змінюється в наступній послідовності: якщо потрібно нанести покриття з чавуну на заготовку зі сталі, то спочатку формують шар з чавуну з максимально допустимою товщиною. Якщо її недостатньо для забезпечення експлуатаційних вимог, далі на цей шар наносять маловуглецеву сталь, потім ще раз покривають чавуном до отримання заданої товщини шару з урахуванням припуску під остаточну обробку; - при покритті чавунної заготовки чавуном на першому етапі наносять маловуглецеву сталь, далі чавун. Якщо необхідно досягти більшої товщини, то далі наносять сталеве покриття, а в кінці створюють чавунний шар з товщиною, при якій досягнуто перевищення загальної величини шару на розмір припуску чистової операції для видалення нерівностей самого покриття. У застосовуваному в промисловості способі отримання металевих, струмопровідних покриттів перед нанесенням покриття в зону розряду вводять хімічно активні флюси, які можуть знижувати рівень теплового захисту матеріалу під покриттям і перешкоджати руйнуванню поверхневого шару основи тепловим потоком від імпульсу струму.

Встановлено допустиму величину енергії імпульсу, яка може забезпечити якісне чавунне покриття на заключному етапі процесу. Розрахункова енергія імпульсу дозволяє обґрунтовано призначити напругу, забезпечувати необхідні технологічні показники процесу відновлення деталей із чавуну. Показано, що для одиничного шару чавуну необхідно вибирати режими з обмеженою енергією імпульсу та наносити шари з розрахунковою швидкістю переміщення інструменту вздовж заготовки. Утворення вибіленого чавуну може викликати появу мікротріщин, які складно та дорого видаляти подальшою механічною обробкою. Оскільки їх глибина можна порівняти з нанесеним покриттям, потрібно режими вибирати такими, щоб гарантувати відсутність дефектів, що знижують якість відновленого виробу. Для цього використовують багат шарове покриття із товщиною кожного якісного шару не більше  $0,3 \div 0,45$  мм. При між шарами накладають прошарки з маловуглецевих сталей, які за рахунок дифузії частини вуглецю в сталь знижують вміст вуглецю на перехідних ділянках зони відновлення. При нанесенні чавунного покриття на алюмінієву деталь вибирають флюс в залежності від марки алюмінієвого сплаву. Флюс, приготований на етиловому спирті з компонентів масою у співвідношенні: порошок флюсу (ФС-71) – 50% по масі; етиловий спирт ( $C_2H_5OH$ ) – 50%, дозволяє досягти максимальної ефективності нанесення чавунних покриттів на алюмінієві метали, т.к. склад його компонентів досить повно відповідає складу матеріалу анода та катода. Фтористий натрій є розчинником та відновником оксидів на поверхні обробки. Виключаючи під час протікання розряду взаємодія зони обробки з навколишньою атмосферою, запропонований флюс забезпечує формування необхідного перехідного дифузійного шару, міцно пов'язаного з основою покриття. Під покриттям формується дифузійний шар, що міцно з'єднує чавунне покриття з основою. Процес нанесення шару виконується на «м'яких» технологічних режимах, у яких немає розтріскування покриття. Для обраного складу флюсу рекомендується застосовувати режим електроерозійного покриття: робоча напруга =  $(40 \div 60)$ ; струм короткого замикання,  $I = (2 \div 7)$  А; тривалість імпульсу,  $t = (100 \div 50)$  мкс; вібрації електрода-інструменту з частотою  $f_{e-i} = 100$  Гц; час нанесення покриття



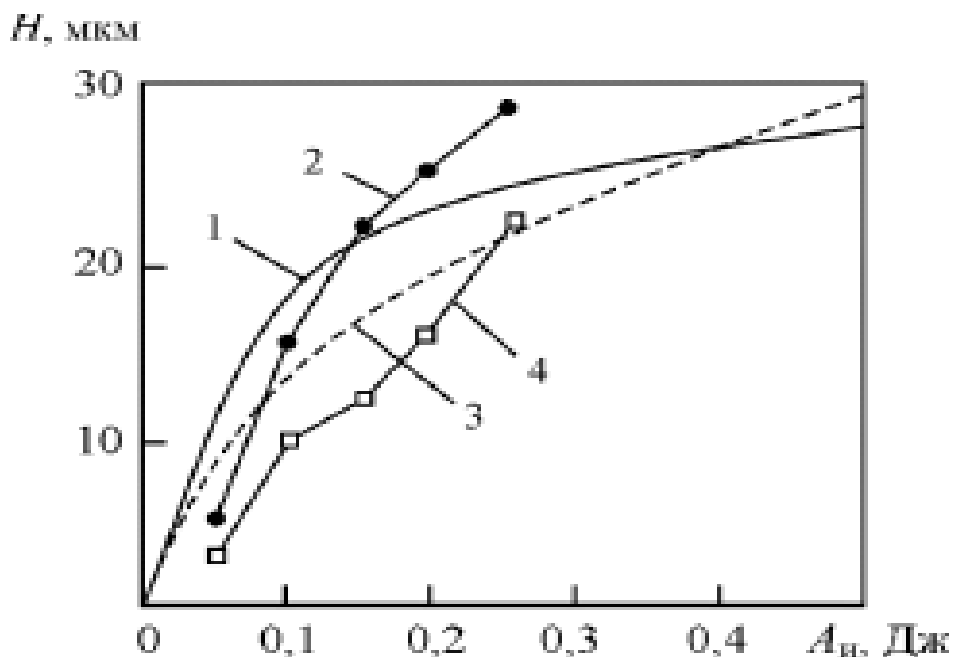
(1÷5) хв/см<sup>2</sup>. Кількість шарів може становити до 3÷4. Величина швидкості подачі електрода-інструменту вибирається з умови забезпечення перекриття сусідніх крапель не менше ніж на 1/4 їх діаметра. Проведений контроль поверхні зразків на відповідність експлуатаційним характеристикам показав відсутність у покриттів, отриманих на вказаних режимах, сітки мікротріщин, пір і припалів, а величина шорсткості поверхневого шару без додаткової обробки отримана в діапазоні = (10÷50) мкм при суцільності покриття (75÷95) %. На рис. 4.9 показано динаміку збільшення товщини шару з необхідними властивостями при нанесенні одного шару покриття, швидкість якого може досягати більше 70 мкм/хв. Припуск, необхідний у разі на чистову обробку (нижня крива на рис. 4.9) також збільшується, а якість остаточного покриття після видалення припуску значно знижується. Товщина якісного покриття за 3÷4 проходи може перевищувати 100 мкм.



**Рис. 4.9.** Зміна товщини нанесеного шару покриття – (верхня крива) та бездефектного шару – від тривалості імпульсу ( $\tau_{\text{и}}$ ) при  $U = 50 \text{ В}$ ,  $I = 4 \text{ А}$ .

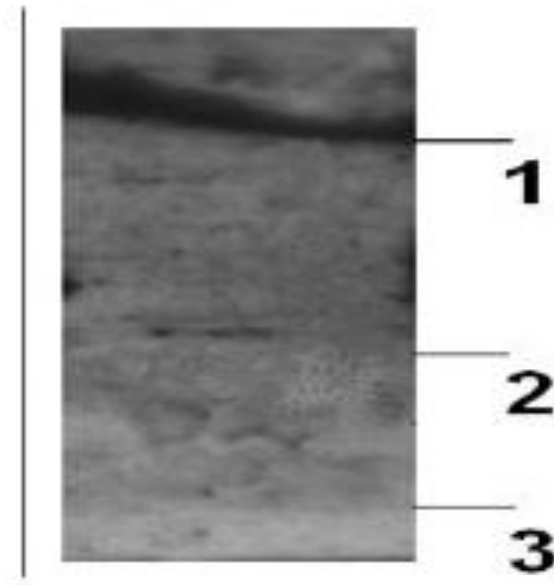
На рис. 4.10 показано залежності, що характеризують зміну товщини покриття та дифузійного шару від енергії імпульсу, де криві 1, 3 отримані розрахунками, а криві 2, 4 – експериментально. З рис. 4.10 видно, що з енергії імпульсу = 0,2 Дж

результати по товщині покриття обох випадках становлять близько 25 мкм, а товщина дифузійного шару перебуває у межах необхідної величини ( $= 5\div 18$  мкм).



**Рис. 4.10.** Зміна товщини ( $H$ , мкм) покриття енергії імпульсу ( $A_{ім}$ , Дж). Шар металу, що наноситься. Залежно: 1 – розрахункова; 2 – експериментальна. Товщина дифузійного шару: 3 – розрахункова; 4 – експериментальна.

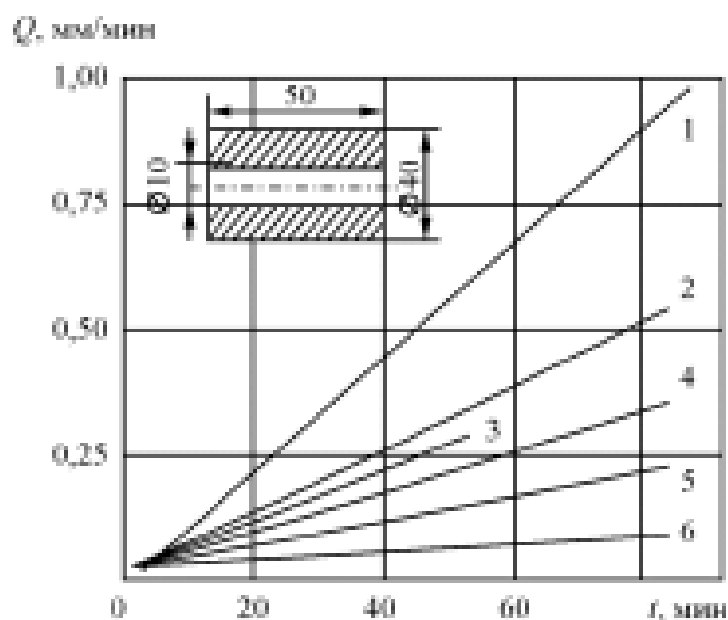
На рис. 4.11. наведено мікроструктуру чавунного покриття, нанесеного комбінованим способом - електроерозійним методом з використанням флюсу на деталь з алюмінієвого сплаву для досягнення підвищеної зносостійкості виробу. Покриття, отримане при м'яких рекомендованих режимах, має необхідну суцільність, в ньому відсутні видимі дефекти, а його товщина становить  $20\div 25$  мкм. Отриманий дифузійний шар у зоні 1 на рис. 6.8 має рівномірну товщину кілька мікрон, а перехідний шар має товщину на кілька порядків менше, ніж товщина в зоні 1. Аналіз рис. 4.11 показує, що дифузійний шар включає взаєморозчинені речовини основи та покриття, що видно із зовнішньої частини покриття як світлі тони. Це показує, що в процесі хімічної дії підповерхневі шари збагачені вуглецем і складаються в основному з аустеніту.



**Рис. 4.11.** Структура покриття із чавуну, нанесеного на алюмінієву основу. Режим обробки: енергія імпульсу  $A_i = 0,2$  Дж: 1 – дифузійна зона; 2 – перехідна зона; 3 – матеріал основи – алюмінієвий сплав Д16 6.5

Технологічний процес комбінованого механічного зміцнення з анодною підготовкою поверхневого шару. На формування шорсткості поверхні впливає механічний режим обробки та значною мірою - електричні параметри комбінованої обробки. При розмірній обробці вуглецевих конструкційних сталей використовується переважно слабкий електроліт на основі хлористого натрію. Його вибір пояснюється високою активацією хлор-іонами та підвищеною електропровідністю розчину. Отримання високої якості поверхневого шару при обробці легованих сталей та кольорових металів можливе при використанні змішаних електролітів. Найбільша продуктивність отримана під час обробки деталі у закріпленому стані. Як показують результати експериментів, застосування змінного струму менш ефективним. Швидкість знімання припуску при різних схемах обробки залежить від інтенсивності механічних та електрохімічних складових ВІАЕХО. У першому випадку спостерігаються різні сили зіткнення, у другому створюється велика щільність струму в місцях обробки. Однак з урахуванням трудомісткості підготовки до виконання операції обробка вільно завантажених деталей при меншій інтенсивності процесу ВІАЕХО

виявляється більш продуктивною через одночасне завантаження більшої кількості деталей. Якщо обробка проводиться при закріпленні деталей з індивідуальним підведенням струму, то за рахунок електрохімічної складової знімання металу помітно зростає. При цьому силові (механічні) параметри значно впливають. У разі великих щільностей струму амплітуда коливань практично не впливає на знімання матеріалу. Аналогічне явище спостерігається і за зміни грануляції абразиву. Вибір частоти коливань може помітно впливати на швидкість видалення припуску через інтенсивне руйнування плівки, що утворюється з продуктів електрохімічного розчинення і знижує швидкість протікання процесу. Вплив ВІАЕХО на технологічні показники комбінованого процесу наведено на рис. 4.12.

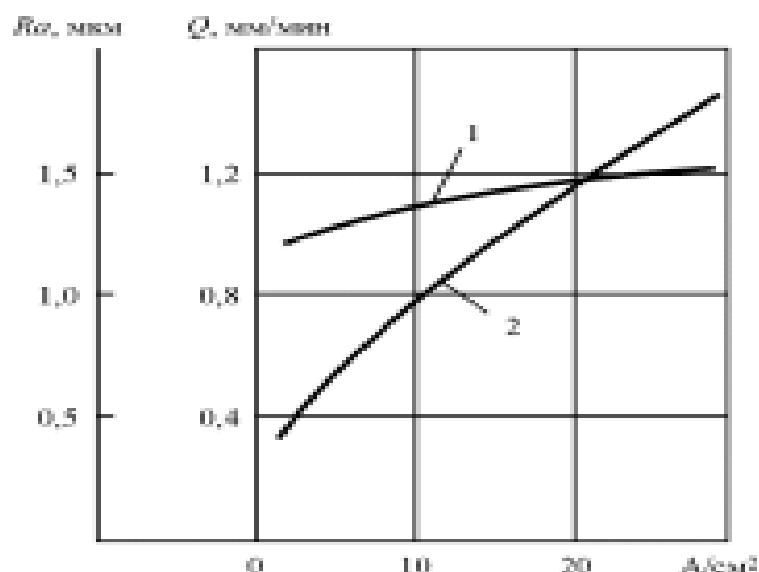


**Рис. 4.12.** Інтенсивність знімання металу.

Зразки зі ст.5, що обробляються в закріпленому стані (1 - 4) та у разі вільного завантаження (5, 6): 1 - при підведенні до зразків постійного струму; 5 – при розташуванні зразків між електродами; 3 – з використанням змінного струму; 4, 6 – без підведення струму.

При поєднанні ВіО з електрохімічним процесом механізм формування шорсткості змінюється, а досяжна шорсткість може дещо знижуватися. При збільшенні струму відбувається зміна висоти мікронерівності (рис. 6.10). Для

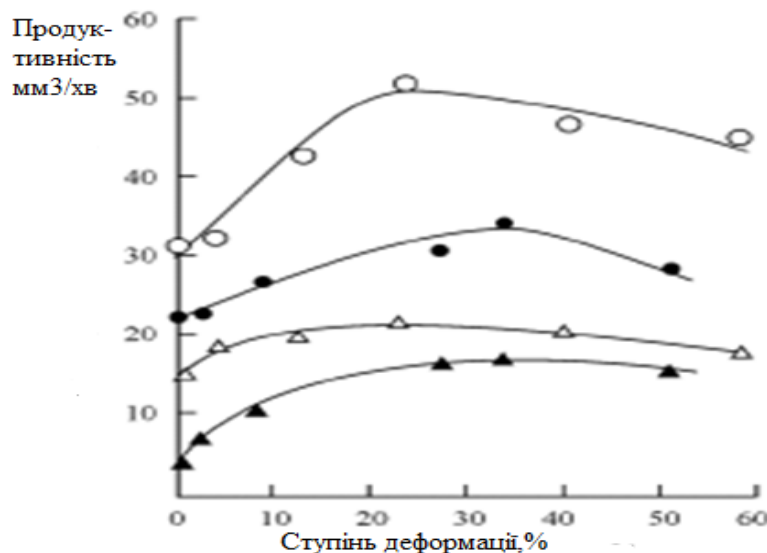
отримання якісної поверхні (без слідів розтравлювання) при ВІАЕХО потрібно розрахувати параметри віброабразивного та електрохімічного процесів за методиками, наведеними раніше.



**Рис. 4.13.** Знімання металу ( $Q$ ) та шорсткість поверхні ( $R_a$ ) при обробці зразків зі сплаву В95Т у закріпленому стані з підведенням струму при міжелектродному зазорі 0,25 мм,  $f = 33$  Гц,  $t = 20$  хв: 1 –  $R_a$  ; 2 –  $Q$ .

Наведені в [29, 37, 43, 54, 64] результати досліджень показують, що швидкість видалення припуску і одержуване якість поверхневого шару при комбінованій обробці багато в чому залежить від хімічного складу матеріалу, що розчиняється. Якщо попередня підготовка поверхні сталей під покриття включає пластичну деформацію, це впливає наступний процес анодного розчинення в проточному електроліті. Згідно з проведеними експериментами, швидкість знімання металу при різному ступені деформації металу може мати максимум, що має місце у середньовуглецевих сталей при деформації 25÷35 %, а високовуглецевої - при 30÷40 % (рис. 4.14). При цьому високовуглецевий матеріал після деформації, наприклад, при комбінованій обробці з металевими кульками, знімається з меншою інтенсивністю. Після добавки хрому сталі мартенситного класу швидкість обробки збільшується, а мінімальне її значення отримано для сталей аустенітного класу. Пластична деформація значно впливає на показники якості поверхневого шару оброблюваної деталі. При деформаціях матеріалу ударним

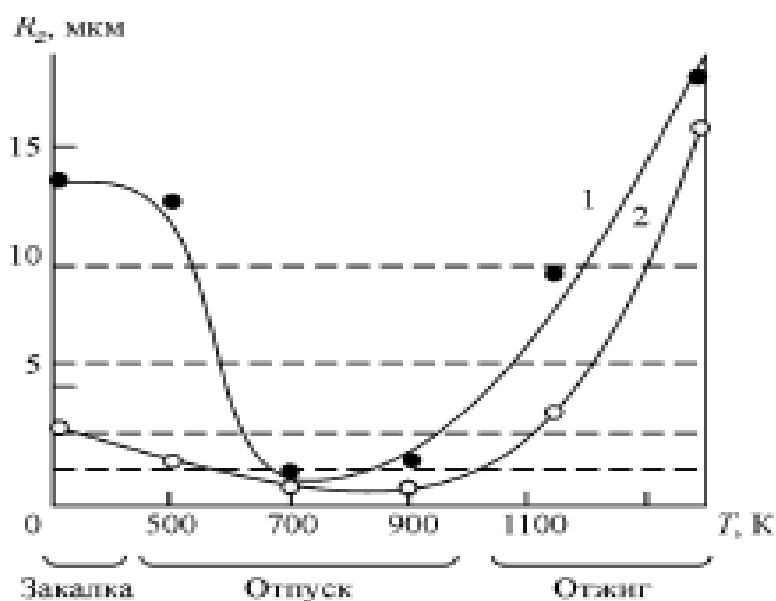
навантаженням до 20÷25 % шорсткість поверхні покриття зменшується, а при подальшому наклеп - збільшується. Найбільша швидкість розчинення металу за рахунок анодної складової (рис. 4.14) та менша висота мікронерівностей (рис. 6.12) досягаються приблизно за однакових ступенів деформації.



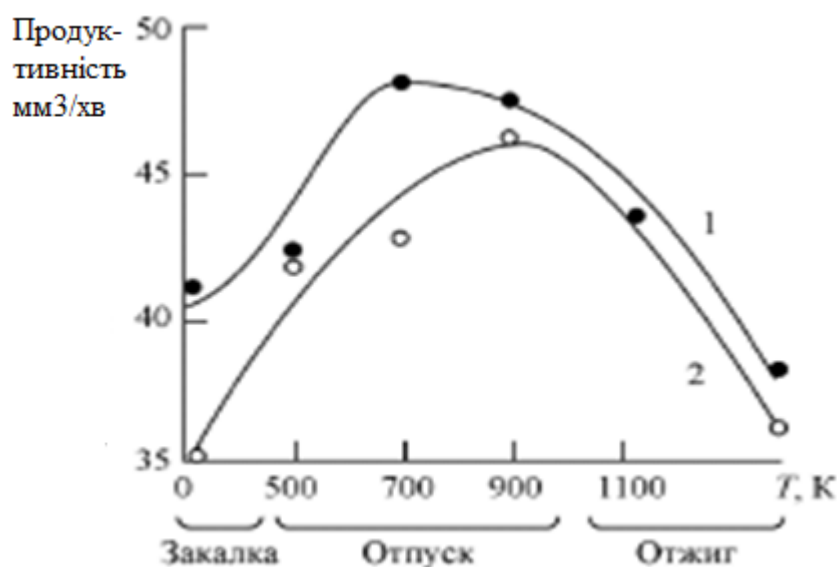
**Рис. 4.14.** Вплив пластичної деформації на швидкість обробки. Сталь 40 (криві 1; 4) та вуглецева сталь У10 (криві 2; 3). Щільність анодного струму (А/см²): 50 (1; 2), 20 (3; 4).

Вплив електрохімічної складової на швидкість видалення припуску і шорсткість поверхні при комбінованій обробці для різних сталей пояснюються, мабуть, змінами їх структури, отриманими при деформації, т.к. у процесі наклепу має місце зміна фізикомеханічних, електричних та інших властивостей металу. Якщо має місце вихід на поверхню структурних дефектів, то відбувається послаблення зв'язку атомів з кристалічними ґратами і з'являються активні центри, що викликають локалізацію в них адсорбованих аніонів, що створюють з металом перехідні комплекси, і збільшення швидкості знімання сталей і зростання їх деформації. Вплив пластичної деформації на параметри процесу електрохімічної розмірної обробки сталей після деформації та після різних термічних обробок (відпалу, гартування, відпустці, нормалізації), показали, що спостерігається підвищення чистоти поверхні та продуктивності процесу порівняно зі сталями,

підданими тим же термообробкам, але без попередньої пластичної деформації (див. рис. 4.15, 4.16). Субмікроструктура сталей (деформованих та без деформації) після різних термічних обробок має структуру, аналогічну отриманій за результатами впливу щільності дислокацій, величини блоків та мікростворень на чистоту поверхні та продуктивність електрохімічної складової процесу комбінованої обробки.



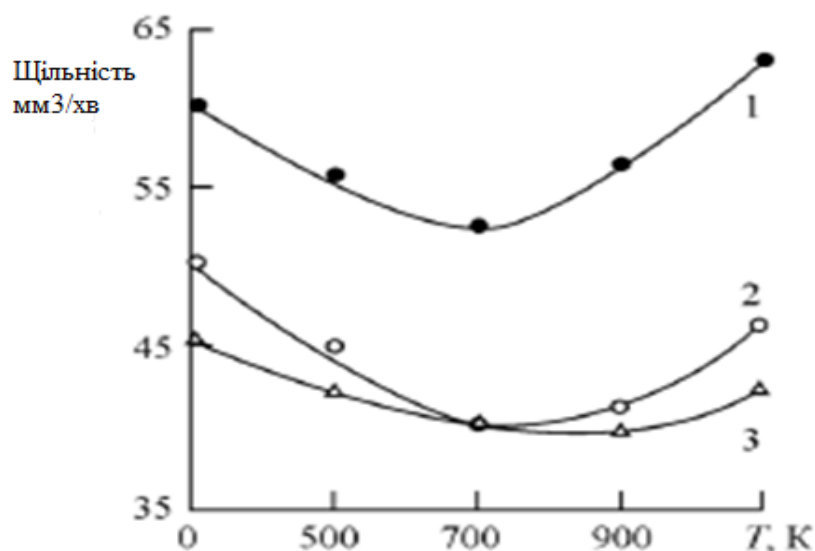
**Рис. 4.15.** Зміна висоти мікронерівності після різних видів термічної обробки Ст. 40: 1 – без попередньої деформації, 2 – після пластичної деформації на 12 %. Анодна щільність струму 60 А/см<sup>2</sup>.



**Рис. 4.16.** Зміна продуктивності процесу при різній термообробці.



Анодна поведінка деформованих сталей за високих щільностей струму в складних гідродинамічних умовах істотно залежить від температури відпустки обробленого металу. Температура відпустки деформованих сталей (рис. 4.17) впливає на продуктивність процесу та на якість обробленої поверхні. Зі зростанням температури відпустки до 670 К продуктивність процесу помітно знижується, потім знову зростає (при подальшому збільшенні температури). Аналогічно оцінюється шорсткість поверхні. Через присутність при комбінованій обробці силових ліній електричного поля можуть утворюватися умови прискореного розчинення металу поблизу мікротріщин, наявних у матеріалі у великій кількості, особливо після загартування. У подібних випадках спостерігається погіршення чистоти поверхні на загартованих і деформованих сталях порівняно з відпусткою, що піддавалися.



**Рис. 4.17.** Продуктивність процесу за різної температури відпустки пластично деформованих сталей: 1, 2 – Ст. 35;  $i=50$  та  $40$  А/см<sup>2</sup> відповідно; 3 – сталь У8А;  $i=40$  А/см<sup>2</sup>.

Ступінь деформації, подальша термообробка металу і швидкість електролізу впливають збільшення анодних щільностей струму, а при комбінованій обробці – з його електрохімічні характеристики.

Високі внутрішні напруги, характерні для зміцнювального впливу (у тому числі металевими гранулами), в умовах активного розчинення прискорюють знімання та поліпшення експлуатаційних властивостей поверхневого шару деталей, що працюють при несприятливих зовнішніх впливах.

#### 4.7. Технологічний процес перетворення геометрії деталі шляхом керування електричним полем.

Однією з масових деталей в енергетичних машинах є форсунки, які розробляються для створюваних апаратів багаторазового використання і від надійності яких залежить надійність роботи теплових агрегатів (рис. 4.18).



а)



б)

**Рис. 4.18.** Форсунки: а – відцентрова форсунка; б – фрагмент вогневої дошки із форсунками.

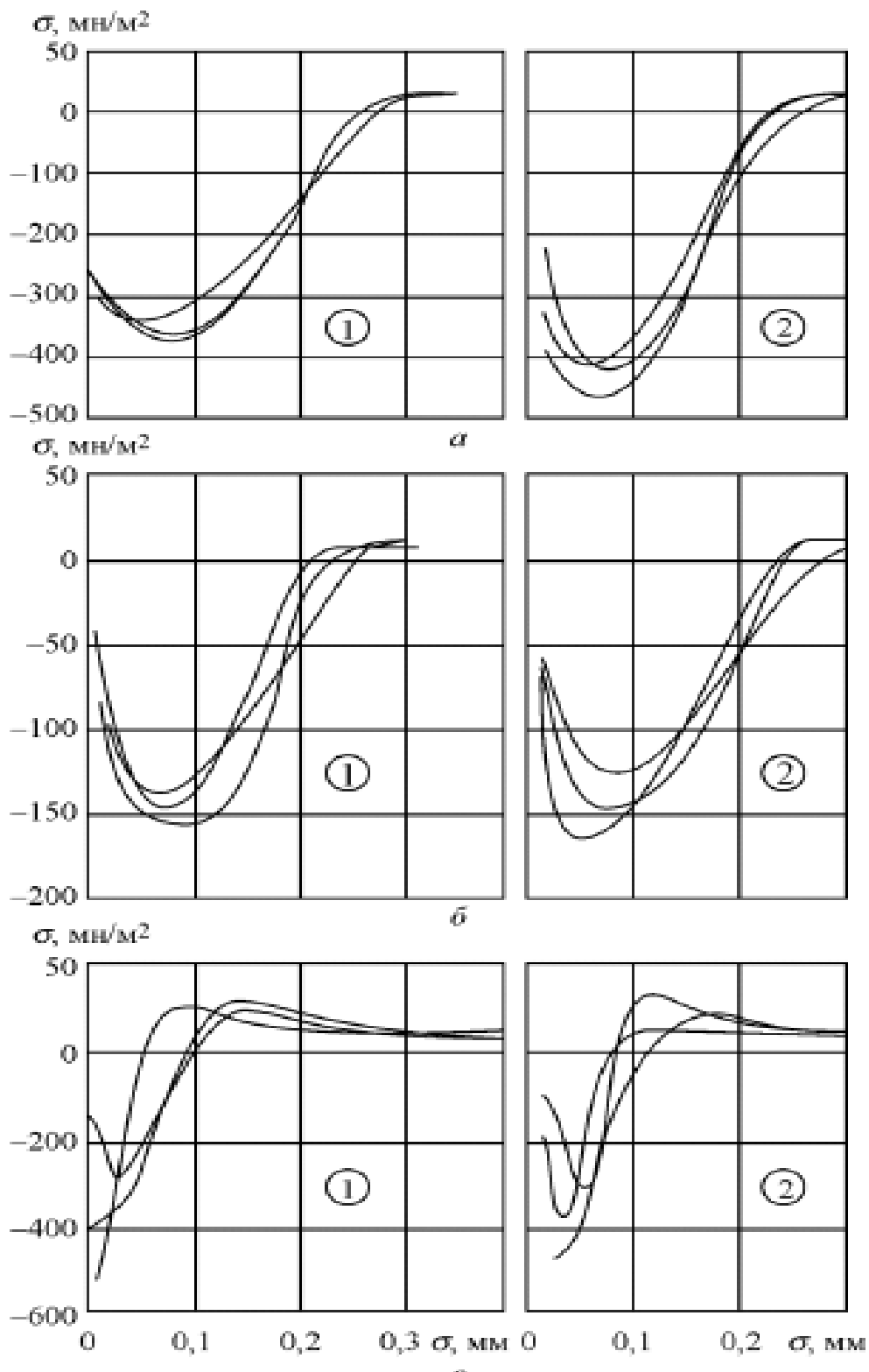
Було обґрунтовано та впроваджено технологію електроерозійної прошивки каналів різного перерізу (діаметр від 0,25 до 1,5 мм), що значно підвищило точнісні характеристики (а, отже, і стабільність роботи форсунок з розпилу та витрати). Створений технологічний спосіб комбінованої ерозійно-термічної обробки забезпечує отримання експлуатаційних властивостей, узгоджених з

розробником при відпрацюванні технологічності виробу. Було досягнуто критерій оцінки показника корисності 1,5 при зниженні показника трудомісткості до 1,2 щодо раніше застосовуваного варіанту ТП. Це дозволило підвищити терmostійкість форсунки до 2 разів порівняно із застосуванням раніше використаного способу комбінованої прошивки циліндричного отвору та багаторазове підвищення щодо періоду використання виготовлення каналів свердління. Випробування виготовлених форсунок на інтенсивність зношування показали можливість підвищити їхнє напрацювання (ресурс) до 1,8 раза. Описана методологія розробки комбінованих технологічних процесів модифікації поверхневого шару для зміни експлуатаційних характеристик за рахунок фізичних впливів та досягнення необхідних експлуатаційних показників шляхом зміни властивостей, нанесення або видалення покриттів є перспективною для застосування у всіх галузях машинобудування.

#### **4.8. Вплив технологічних режимів зміцнення із нанесенням покриття на експлуатаційні показники виробів.**

Вібродударне зміцнення з анодним розчиненням поверхневого шару (РПШ) дозволяє підвищити фізико-технічні характеристики, знизити шорсткість поверхневого шару, підвищити межу витривалості виробів [38]. Отримані епюри осьових залишкових напруг у зразках з вібрударним зміцненням, які наведені на рис. 4.19, звідки видно, що для досліджених матеріалів розподіл залишкових напруг носить однаковий характер. Силовий вплив зміцнюючої обробки значний, і кінцевий результат обробки залежить від стану вихідної поверхні. За всіх варіантів попередньої обробки досліджені зразки мали однаковий ступінь наклепу. Після електрохімічної обробки зі зміцненням спостерігається незначне збільшення величини залишкової напруги та зниження глибини їх поширення. В силу сказаного при призначенні режимів зміцнення знадобилося незначне коригування параметрів щодо використовуваних при вібрударному зміцненні без накладання електричного поля. Подібне коригування для алюмінієвого сплаву, де

глибина і знак залишкової напруги практично збігаються в обох варіантах процесу обробки, не потрібно.



**Рис. 4.19.** Залишкові напруги , що виникають після механічної обробки та електрохімічної розмірної обробки зі зміцненням [33]: а - 40ХНМА; б – АВТ1; в – ВТЗ-1. Режими:1 - після механообробки зі зміцненням; 2 - після електрохімічної розмірної обробки із зміцненням.

Кінцевим етапом операції при обробці сталі 0ХНЗМФА була обрана піскоструминна обдування, і епюри після попередньої електрохімічної, механічної та комбінованої обробки стали однаковими, де глибина залишкових напруг стиснення не перевищує  $0,2 \pm 0,25$  мм, що забезпечує підвищення втомної міцності деталей значення яких навіть перевищувати рівень цього показника для зміцнених поверхонь після різання.

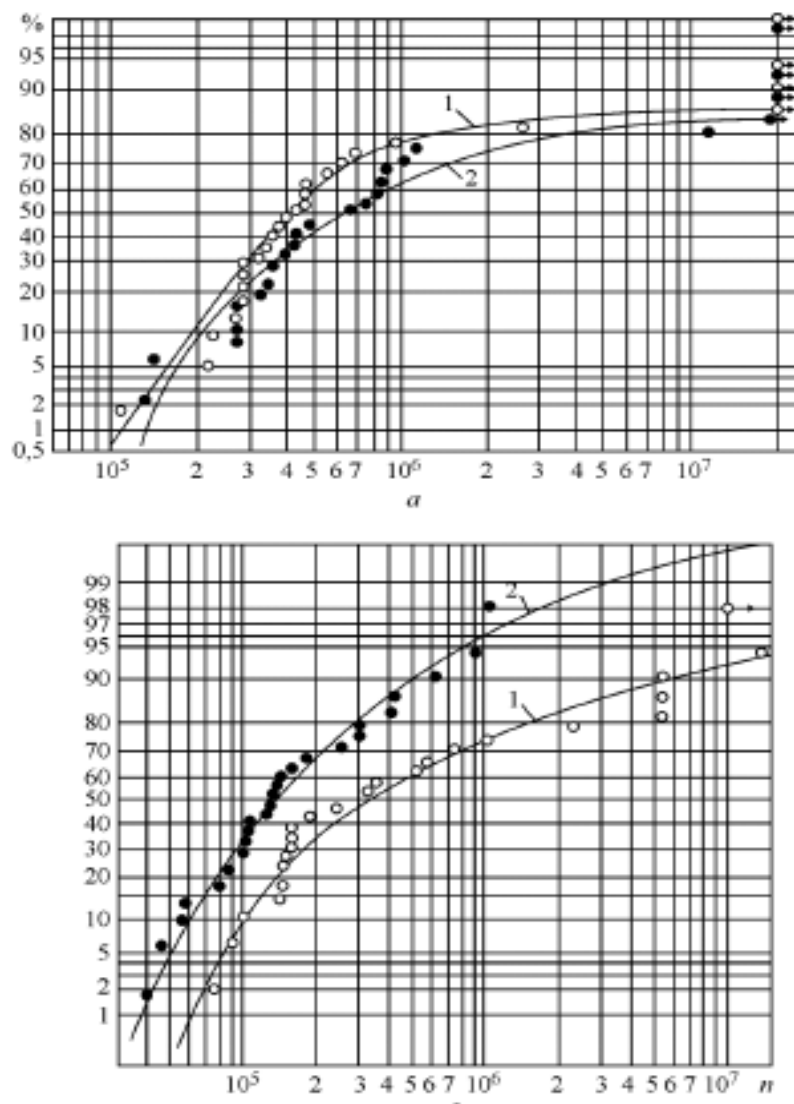
У табл. 4.2 показано, що межа витривалості для зміцнених матеріалів значно більша, ніж для вихідного стану, у тому числі після ЕХО. При цьому втомні показники зростають у порівнянні зі зразками зі вихідного матеріалу, а шорсткість поверхні залишається однаковою.

**Таблиця 4.2. Втомна міцність матеріалів з комбінованим віброударним зміцненням**

Марка матеріалу	Межа усталостної міцності, МПа	Зміна межі витривалості при електрохімічній обробці в порівнянні з механообробкою	
		МПа	%
40ХНМА	560	+30	+5,6
АВТ-1	115	+10	+9,5
ВТЗ-1	580	+60	+11,5

З табл. 4.2. видно, що для виробів після ЕХО, що не пройшли наклепу поверхні, спостерігається зниження втомної міцності [38]. При віброударному зміцненні досягається значне підвищення межі витривалості значно вище, ніж після обробки різанням. На рис. 4.20 наведено залежності, що характеризують ймовірність руйнування зразків після зміцнення з матеріалів, що пройшли випробування при однаковому рівні напруги (наприклад, у 40ХНМА - 580, ВТЗ-1-630 МПа) [38]. Спостерігається деяка перевага електрохімічної обробки, хоча для сталі типу 40ХНМА (рис. 4.20, а) перевагу за рівнем надійності виробу якомусь варіанту обробки віддати досить важко. Подібна картина спостерігається і для сплаву АВТ1. Для сплавів з титану (рис. 4.20 б) і аустенітних жароміцних сплавів

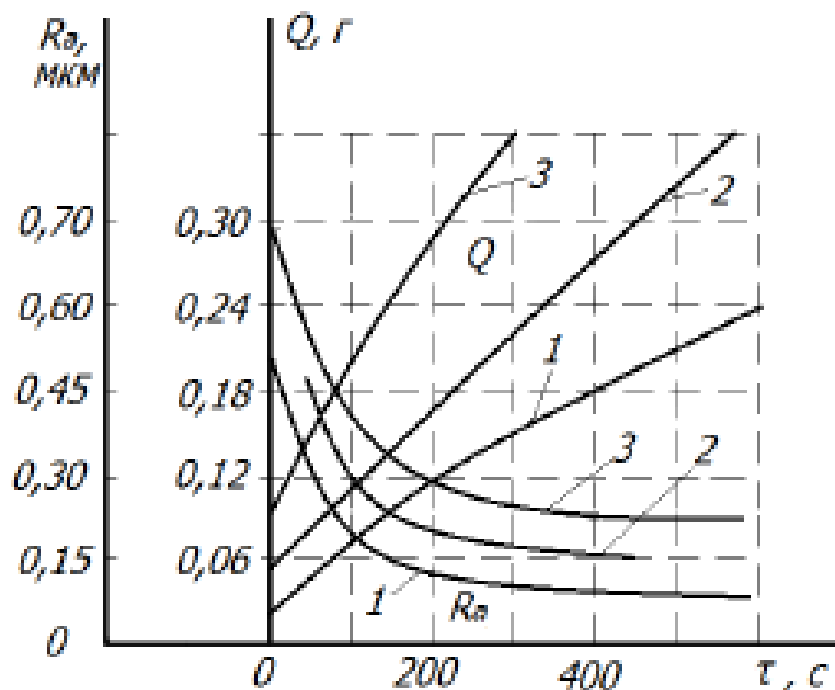
зміцнення після або спільно з ЕХО [42] можливе отримання виробу з надійністю не нижче, ніж при механічній обробці (рис. 4.21).



**Рис. 4.20.** Залежність ймовірності руйнування зразків після зміцнення від числа циклів навантаження  $n$ : а – зі сплаву 40ХНМА; б - зі сплаву ВТЗ-1. Види обробки: 1 – механічна; 2-електрохімічна обробка з наступним віброударним зміцненням.

Механізм утворення залишкових напруг при віброабразивній комбінованій обробці з ВІЛ (ВІАЕХО) та при віброабразивній (ВІО) не має суттєвих відмінностей [40]. Різниця полягає лише в тому, що при ВІАЕХО показники поверхневого шару матеріалів формуються під дією 2 факторів: ударного деформуючого впливу гранул та знімання металу за рахунок дії параметрів –

механічної та електрохімічної обробки. При ВІО спостерігається пластична деформація поверхневого шару з утворенням стискаючих залишкових напруг. При ВІАЕХО знімання відбувається за рахунок анодного розчинення зони зміцнення металу. Величина залишкових напруг і глибина їх поширення залежить від співвідношення впливів з складовими процесу ВІАЕХО. Робоче середовище, що включає сталеві загартовані кулі або ролики різних розмірів, помітно впливає на зміну мікротвердості поверхневого шару матеріалів після зміцнювальної обробки розглянуто в [40]. Для всіх варіантів обробки істотних змін мікротвердості не встановлено. Це дозволяє стверджувати, що комбінована обробка (ВІАЕХО) не погіршує зносостійкості та довговічності контактних пар.



**Рис. 4.21.** Зміна шорсткості зразків та знімання металу (маси) від тривалості обробки. Матеріали: 1 – сталь ШХ15; 2-сталь 45, HRC 42-45; 3 – сталь 45, HB 170-190.

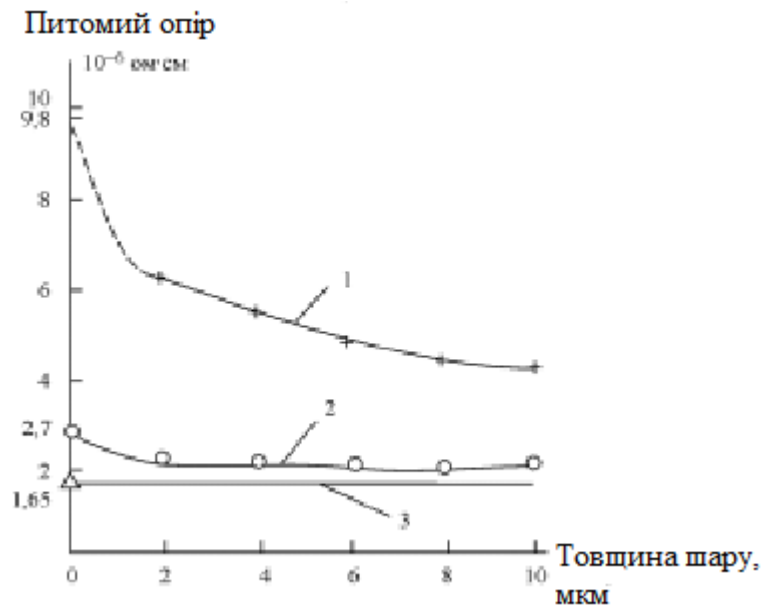
Для досягнення необхідної шорсткості поверхні необхідно змінити умови обробки. Відомо, що інтенсивність видалення припуску для будь-якого досліджуваного матеріалу залежить, у тому числі, від величини мікронерівності, які формуються на поверхні в результаті обробки. Встановлено, що показники



вихідної шорсткості слабо впливають кінцеву величину шорсткості (див. рис. 4.20).

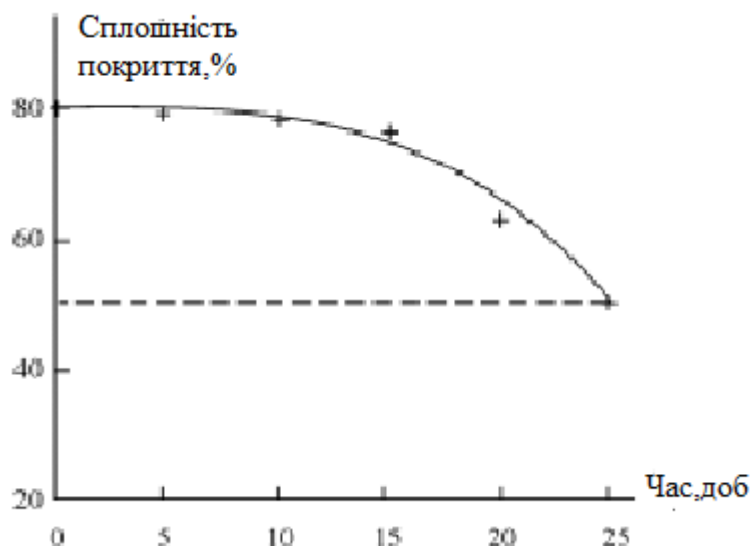
#### **4.9. Експлуатаційні характеристики деталей з тонким шаром електроерозійного покриття.**

Тонке покриття металів передбачає нанесення шару завтовшки до 10 мкм. Найчастіше тонке покриття застосовують зміни електротехнічних і механічних властивостей деталей: наносять на поверхню матеріали з низьким питомим опором (срібло, мідь та інших.), із захисними властивостями від корозії (срібло, цинк, кадмій та інших.); виконують покриття з твердих сплавів, що підвищують зносостійкість інструменту та пар тертя механізмів і одночасно захищають матеріал деталі від корозії, у тому числі під час роботи в агресивних середовищах. Найчастіше для таких цілей рекомендують тонкі срібні покриття, де при незначній витраті матеріалу можна забезпечити помітне підвищення експлуатаційних показників виробів. На рис. 4.22 показано динаміку зменшення питомого опору матеріалів у різних контактних з'єднаннях, що застосовуються, в основному, в радіотехніці та приладобудуванні після нанесення на ділянки контакту срібла. З рис. 4.22 видно, що покриття контактної поверхні сріблом з товщиною 8÷10 мкм дозволяє знизити питомий опір більш ніж 2 рази. Виконання такої операції для деталей з алюмінію і міді технічно здійснено, але нерационально, т.к. досягнутий ефект незначний (особливо для міді), хоча захисні властивості срібла і перевищують цей показник для міді. Тому електроерозійне сріблення використовують у невідповідних штепсельних роз'ємах, де застосовується переважно латунь.



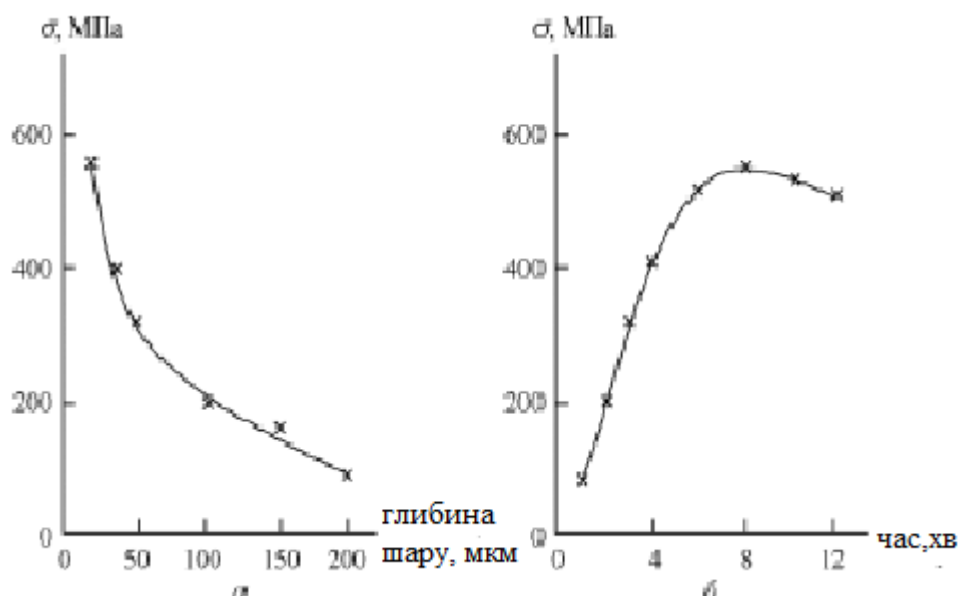
**Рис. 4.22.** Зміна питомого опору контактних пар після електроерозійного покриття сріблом.

Матеріал деталі: 1 – сталь; 2 – алюміній; 3 питомий опір срібла. Корозійну стійкість захисних покриттів оцінюють зміною суцільності нанесеного матеріалу (рис. 4.33).



**Рис. 4.33.** Зміна суцільності покриття за результатами тимчасових випробувань на корозійну стійкість. Середовище випробувань – пари сірчаної кислоти. Покриття – шар срібла завтовшки 8 мкм. Основа – сталь 45.

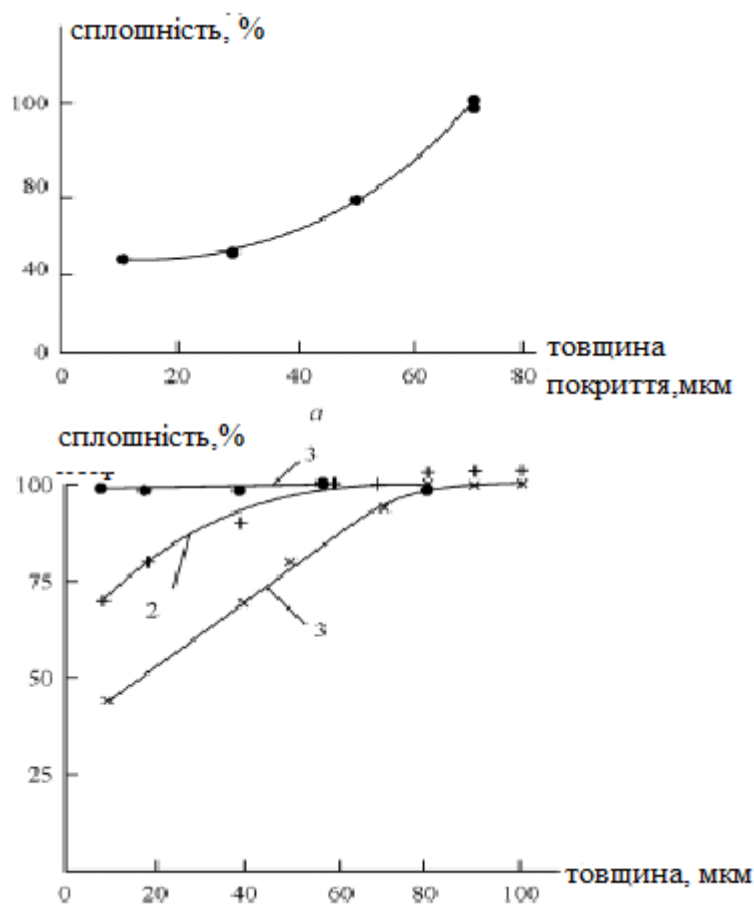
Як показав досвід, для тонких покриттів без подальшого розкочування не вдається отримати суцільність вище 70÷80%, тому їх можна рекомендувати для відновлювальних операцій виробів, що працюють у неагресивних середовищах. Зазвичай, цей діапазон покриттів має товщину 0,1÷0,3 мм. Тут можна розглянути розроблені в останні роки перспективні види багат шарових покриттів, що мають сумарну товщину до декількох міліметрів.



**Рис. 4.34.** Залишкова напруга в поверхневому шарі деталей з покриттями: а - зміни по глибині покриття; б - зміни поверхневому шарі залежно від часу нанесення покриття. Інструмент – твердий метал; деталь – вуглецева сталь.

Для покриттів, що мають товщину до 200÷250 мкм, розтягують залишкові напруги (рис. 3.6 а) досягають 600 МПа (покриття виконано твердим сплавом вольфрамowo-кобальтової групи, нанесеним на вуглецеву сталь). Позитивний знак напруги у деталей з покриттям може викликати зниження показників міцності деталей. Це переважно стосується виробів, які працюють при знакозмінних високочастотних коливаннях (транспортні машини, вібростенди та ін.). Напруги нарастають протягом часу нанесення покриття (рис. 4.34 б). Наведені в [47] відомості показують, що у зразків зі сталі 45 з покриттям 200 мкм залізом має місце зниження втомної міцності до 22%. Після алмазного вигладжування має

місце збільшення тривалості роботи (рис. 4.34 б) покриття, і цей показник відновлюється, що дозволяє успішно застосовувати зміцнені деталі в різних умовах експлуатації. Суцільність покриттів впливає на експлуатаційні властивості виробів із покриттями. На рис. 4.35 показано, як різні види покриттів сталі забезпечують їх суцільність. Однак із наростанням шарів змінюються інші параметри, і в ряді випадків доводиться обмежувати товщину (іноді до 2 разів).

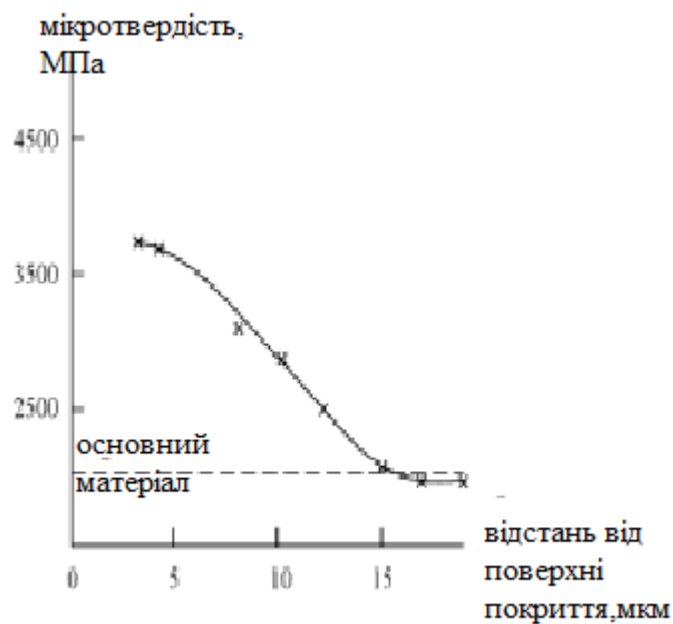


**Рис. 4.35.** Суцільність покриття: а - з латуні сталі: 1 – стрижневим інструментом (швидкість зростання покриття 1,5 мг/мм<sup>2</sup>); 2 – порошковим матеріалом (інтенсивність покриття 1 с/мм<sup>2</sup>); 3 – порошковим матеріалом із розкочуванням покриття роликком; б - із твердого сплаву по сталі (енергія імпульсу-1 Дж).

### Комбіновані методи.

При відновленні деталей можуть використовуватися покриття завтовшки кілька міліметрів. Так [43] наведені відомості про отримання шару міді М1 на сталі

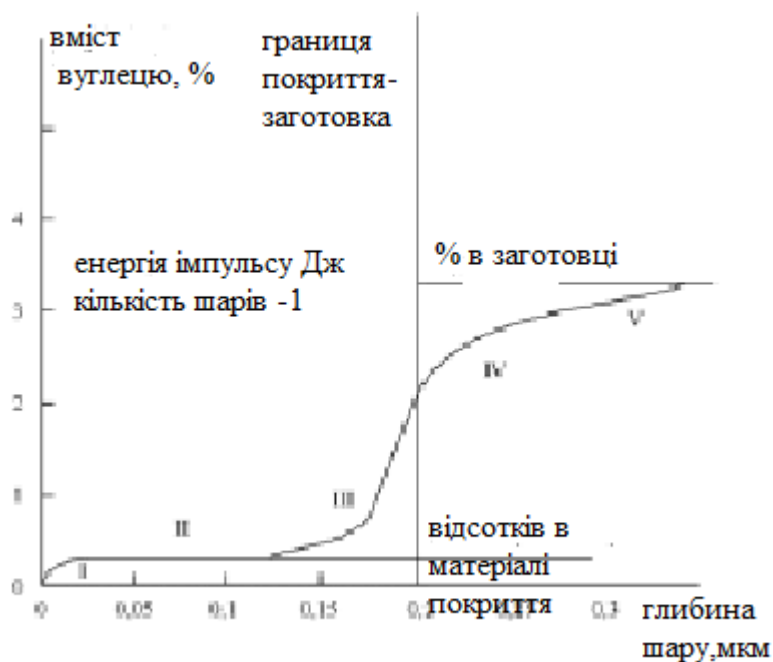
X12M товщиною 1,3 мм. Мікротвердість покриттів (рис. 4.36) залежить від властивостей матеріалу інструменту та в  $1,5 \div 2$  рази може перевищувати показник вихідного матеріалу деталі. Це [53] збільшує зносостійкість виробів до  $4 \div 5$  разів.



**Рис. 4.36.** Мікротвердість хромистої сталі після покриття хромовим шаром завтовшки 19 мкм.

Струм короткого замикання – 6,4 А; швидкість переміщення інструменту – 1-1,2 мм/с В роботі [58] запропоновано для підвищення товщини покриття чавуну по сталі або чавуну застосовувати багат шарове нанесення матеріалу, послідовно накладаючи шари сталі або чавуну. Не завжди можна відновити чавунні деталі сталевим покриттям, оскільки для отримання вихідних властивостей їх поверхні потрібно нанесення матеріалів з характеристиками, аналогічними експлуатаційним властивостям деталей після експлуатації. Раніше намагалися наносити товсті покриття з чавуну на заготовки з аналогічного матеріалу, але вони не завжди вдалими, т.к. вибілений чавун міг мати розвинену сітку тріщин, і під час роботи виробу інтенсивно руйнувався. Характеристики шарів чавунного покриття залежить від енергії застосовуваних імпульсів. Експериментально доведено, що дифузійний шар вуглецю на деталях чавуну СЧ40 після нанесення аналогічного покриття при використанні імпульсів з енергією 2 Дж становить 0,2

мм. При цьому в матеріалах вміст вуглецю збільшується до  $3 \div 3,3$  %. Розрахунки температур на поверхні покриття показали, що їх величина може досягати  $1500 \div 1600$  К, а при вимірі цієї величини на глибині 20 мкм – близько 2000 К. Вуглецю в покритті із сталі 3 виявлено від 0,25 % до  $2 \div 2,5$  % (рис. 4.37) (стандартний вміст вуглецю  $0,3 \pm 0,5$ %).



**Рис. 4.37.** Вміст вуглецю при покритті чавуну сталлю.

На рис. 4.37 наведено результати дослідження властивостей сталевих покриттів. Показано, що при вмісті вуглецю більше 3,5 % і температурі вище 1400 К утворюється дефектний шар, а при покритті чавуном з малою товщиною вибілений шар знаходиться в приповерхневій зоні і може розташовуватися на глибині, що перевищує  $0,03 \div 0,05$  мм. У разі покриття чавуну сталлю вибілений чавун не утворюється як по глибині покриття, так і в поверхневих шарах чавунних матеріалів. У ряді випадків кількість вуглецю в покритті виявляється нижчою, ніж це потрібно під час експлуатації виробів. На ділянці I (рис. 4.37) на поверхні деталі вміст вуглецю виявився нижчим, ніж у поверхневого шару з маловуглецевої сталі. Очевидно, це спричинено вигорянням вуглецю під дію тепла від перегрітої краплі металу, знятої з анода. На рис. 4.37 наведено ділянки II та III, де вміст вуглецю однаковий, хоча його кількість може зростати в силу

зворотної дифузії у покриття з матеріалу заготівлі (ділянка III). Кількість вуглецю на межі «покриття - заготівля» знаходиться менше, ніж у заготовці (ділянка V), а ділянка IV з меншим його вмістом може мати товщину, порівнянну з товщиною покриття. При послідовному комбінованому нарощуванні покриття чавуном через шари стали вдалося уникнути погіршення якості виробів, що відновлюються, і підвищити загальну товщину шару до 1,5 мм. При цьому збережено бездефектну підповерхню зони з чавуну (див. табл. 4.3).

**Таблиця 4.4. Оцінка граничної енергії імпульсу, що забезпечує отримання якісного чавунного покриття**

товщина шару чавуну, мм	величина енергії імпульсу	характеристика поверхневого шару	
		отримання відбіленого шару	утворення мікротріщин
0,1	0,22	не виявлено	не виявлено
	0,31	не виявлено	не виявлено
	0,5	не виявлено	не виявлено
	0,8	не виявлено	не виявлено
0,2	0,31	не виявлено	не виявлено
	0,5	випадкове проявлення фрагментарне проявлення	не виявлено
	0,8	фрагментарне проявлення	не значне
0,3+0,45	0,5	випадкові дільниці	не значне
	0,8	преривчасті дільниці	мікротріщини до 0,5 товщини
	1,0	значні дільниці	сітка тріщин глибиною до 0,2 мм

У роботах [42, 54, 67, 74 та ін] розглядаються нові способи формування поверхневих шарів, розроблені останнім часом. У верстатобудуванні та при виготовленні машин для сільського господарства, транспорту більшість деталей виготовляють литтям у піщані форми із сірого чавуну. У деталях можуть виникати різні дефекти: порожнечі, раковини, місцеві недоливи, що виникають у поверхневому шарі, які необхідно усунути за збереження структури вихідного



матеріалу і без формування вибіленого чавуну. Деталі, отримані литтям з чавуну, можуть зношуватися в процесі експлуатації і їх необхідно відновлювати без застосування значного нагрівання покриття. Відомі способи відновлення розмірів литих чавунних деталей не забезпечують стабільного отримання необхідної структури матеріалу, викликають зміну форми деталей і втрату їх точності профілю. Спроби застосування електроерозійної обробки відновлення чавуном форми чавунних (а також сталевих) деталей давали прийнятний результат у разі товщини покриття менше 0,4 мм, а це в більшості випадків не відповідало вимогам замовника. Збільшення товщини чавунного покриття призводило до появи шару вибіленого чавуну з розвиненою сіткою тріщин, а при нарощуванні кількох шарів не вдавалося отримати хорошу адгезію між шарами та надійний зв'язок із основою (сталь, чавун, інші метали). Крім того, зі збільшенням кількості шарів (з метою збільшення товщини покриття) знижується якість поверхневого шару та швидкість обробки, що робить електроерозійний метод менш рентабельним. Розроблені методи нанесення багатошарових покриттів із змінним нарощуванням шарів сталі та чавуну за способами [76, 79] дозволили зняти практично всі зазначені обмеження та отримати інструмент для відновлення геометрії та експлуатаційних властивостей покриттів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міцність та надійність машин/ В.Я. Анілович, О.С. Гринченко, В.В. Карабін та ін.; за ред В.Я. Аніловича — К.: Урожай, 1996.-248 с.
2. Лайнер, В. І. Захисні покриття металів / В. І. Лайнер. - : Металургія, 1984. - 398 с.
3. Гитлевич, А. Е. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский, В. М. Ревутский ; под ред. акад. АН МССР Ю. Н. Петрова. – Кишинев : Штиинца, 1985. – 196 с.
4. Кравчук, В. С. Опір деформації і руйнування поверхневих зміцнених деталей машин і елементів конструкцій / В. С. Кравчук, А. А. Юсеф, А. В. Кравчук. - Одеса: Астропринт, 2000. - 160 с.
5. Гур'янов, Г. В. Підвищення зносостійкості деталей машин композиційними покриттями з включенням поліепоксиду / Г. В. Гур'янов, Ю. Є. Кисіль // Ремонт. Відновлення. Модернізація. - 2018. - № 3. - С. 13-16.
6. Гур'янов, Г. В. Електроосадження зносостійких композицій / Г. В. Гур'янов. - Кишинів: Штиинца, 1985. - 238 с.
7. Dicusar A.I. Obtaining Nanowires under Conditions of Electrodischarge Treatment. In Nanowires-Implementations and Applications Edited by Abbass Hashim Croatia 2011 pp.357-374.
8. Agafii V.I., Yurchenko E.V., Yurchenko V.I., Petrenko V.I., Dikusar A.I. Deposition of Al-Sn Nanostructuring Coatings on Aluminum Surface Using Electrospark Alloying and Their Wear Resistance under Friction in Oil. International conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering German-Moldovan Worksnop on Novel Nanomaterials for Electronic, Photonic and Biomedical Applications Proceedings. Chisinau, Moldova April 18- 20. 2013 p. 227-230.
9. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г.В. Самсонов, А.Д. Верхотуров, Г.А. Бовкун, В.С. Сычев. –К.: Наукова думка, 1976. – 220 с.

10. Біловод, А.І. До питання зносостійкості відновлених робочих органів сільськогосподарських машин / О.І. Біловод, А.А. Дудников, А.В. Канівець, В.В.Дудник // Наукові нотатки. - 2011. - № 31. - С. 33-36.
11. Черноіванов В.І. Організація та технологія відновлення деталей машин. - М.: Агропромиздат, 1989. - 336 с.
12. Уминський С.М., Інютин С.В, Чучуй В.П. Технічний сервіс в АПК. Видавництво та друкарня «ТЕС», ISBN 978-617-7054-07-7, 2013 р.196 с
13. Крагельський, І. В. Основи розрахунку на тертя і знос / І. В. Крагельський, М. Н, Добичін, В. С. Комбалу. - М.: Машинобудування, 1977. - 526 с.
14. Лайнер, В. І. Сучасна гальванотехніка / В. І. Лайнер. - М.: Металургія, 1987. - 384 с.
15. Novák, P. Application of overlaying material on surfacing of ploughshare for increasing its service life and abrasive wear resistance / P. Novák, M. Müller, P. Hrabě, // Agronomy Research. – 2015 (1). – Vol. 13 – p. 158-166.
16. Müller, M. Application of overlay material on soil processing tools for purpose of increasing their abrasive wear resistance / M. Müller, R. Chotěborský, P.Hrabě // Listy Cukrovarnicke a Reparske. – 2015. Volume 131, Issue 9-10, September, Pages 279-283.
17. Agafii V.I., Yurchenko E.V., Yurchenko V.I., Petrenko V.I., Dikusar A.I. Deposition of Al-Sn Nanostructuring Coatings on Aluminum Surface Using Electrospark Alloying and Their Wear Resistance under Friction in Oil. International conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering German-Moldovan Worksnop on Nomel Nanomaterials for Electronic, Photonic and Biomedical Applications Proceedings. Chisinau, Moldova April 18-20. 2013 p. 227-230.
18. Вольферц, Г. А. Електроіскрове легування робочих органів машин / Г. А. Вольферц, А. А. Максимов, В. В. Ціцілін, В. М. Боярінцев // Вісті вузів - 2004. - №4. - С. 138-139.
19. Іванов, Г. П. Технологія електроіскрового зміцнення інструментів і деталей машин [Текст] / Г. П. Іванов - .: Машинобудування. 1991. - 303 с.
20. Karpenko, V.Yu. Studing Tungsten-containing Electroerosion Powders and Alloys Synthesized from Them / E.V. Ageev, E.V. Ageeva, V.Yu. Karpenko,

- A.S. Osminina// *Journal of nano- and electronic physics.* – 2014. – Vol. 3. – pp. 03049-1– 03049-3.
21. Лебединський, Ю. Н. Комбіновані електролітичні покриття / Ю. М. Лебединський. - Київ: Техніка, 1980. - 174 с.
22. Лебединський, Ю. Н. Дисперсне зміцнення електрохімічних покриттів / Ю. М. Лебединський, Л. І. Антропов // Застосування металопокриттів при виробництві та ремонті деталей машин. - Київ: Металургія, 1987. - С. 308.
23. Установка для електроіскрового нанесення металевих покриттів «ALIER-31». Паспорт.
24. Довідник з гальванотехніки / під ред. В. І. Лайнера.- М.: Металургія, 1987. - 586 с.
25. Філатов, В. І. Композиційні електроосаджуємі матеріали / В. І. Філатов. - Кишинів: 1986. - 76 с.
26. Антропов, Л. І. Композиційні електрохімічні покриття / Л. І. Антропов, Ю. Н. Лебединський. - Київ: Техніка, 1989. - 200 с.
27. Nikolenko, S.V. Nanostructuring a steel surface by electrospark treatment with new electrode materials based on tungsten carbide / S.V. Nikolenko, A.P. Kuzmenko, D.I. Timakov, P.V. Abakymov // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* - 2011. - Vol. 47. - № 3. - P. 217-224.
28. Алімбаєва, Б.Ш. Відновлення деталей військової автомобільної техніки електроіскровим легуванням / Б.Ш. Алімбаєва, Е.Н. Миловидов // *Матеріали Межвуз. наук.-практ. конф. «Удосконалення системи експлуатації ВВСТ»*:- - 2014. - С. 126-129.
29. Аскіназі, Б.М. Зміцнення і відновлення деталей машин електромеханічної обробкою / Б.М. Аскіназі // 3-є изд., Перераб. і доп. -: *Машинобудування*, 1989. - 200 с.
30. С. М. Уминський, Б.В. Лебедев, П.І. Осадчук, С. С.Житков *Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Видавництво та друкарня «ТЕС»*., ISBN 978-617-77711-53-6, 2020 p.180с

31. Молодик, Н. В. Відновлення деталей машин: довідник / Н. В. Молодик, А. С. Зеїкін. - .: Машинобудування, 2009. - 479 с.
32. Дацюк Л.М., Вржещ М.В. Трактори і автомобілі. Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2017. 236 с.
33. Сасенко А.В. Трактори і автомобілі. Частина 1: Конструкція тракторів і автомобілів. Суми: СНАУ, 2012. 549 с.
- 34.Топілін Г.Є Уминський С.М. , Чучуй В.П. Експлуатаційна технологічність тракторів. Видавництво та друкарня Сімекспрінт, ISBN 978-966-2771-35-0. 2014р., 593 с. <https://textbook.com.ua/ekologiya/1473446044>
34. Добровольский А.Г., Кошеленко П.И. Абразивная износостойкость материалов. Киев: Тэхника, 1989. 128 с.
35. Молчанов, В. Ф. Отримання комбінованих покриттів при хромування / В. Ф. Молчанов. - Київ: Машинобудування, 2004. - 89 с.
36. Молчанов, В. Ф. Хромування в саморегулюючих електролітах / В. Ф. Молчанов. - Київ: Техніка, 2002. - 155 с.
37. Лепешкин, А. В. Гідравліка та гідропневмопривід: підручник. - Ч. 2. Гідравлічні машини та гідропневмопривід / А. В. Лепешкин, А. А. Михайлин, А. А. Шейпак; під ред. А. А. Шейпака. - М.: МГИУ, 2003. - 352 с.
38. Лівшиць, Б. Г. Металографія / Б. Г. Лівшиць - М.: Металургія, 1990. - 336 с.
- 39. Васильєв, Б.А. Гідравлічні машини / Б.А. Васильєв, Н.А. Грець. : Агропромиздат, 2008. - 272 с.**
40. Кирилів, Ю.І. Ремонт та експлуатація об'ємного гідроприводу / Ю.І. Кирилів, Ф.А. Каулін, А.М. Хмелевий. : Агропромиздат, 1987. - 80 с.
41. Гідронасос НПА-112. Технічний паспорт/ВАТ «Гідромаш», 2006. – 20 с.
42. Гідромотор МПА-112. Технічний паспорт/ВАТ «Гідромаш», 2006. – 20 с.
43. Беленков, Ю.А. Надійність об'ємних гідроприводів та їх елементів/Ю.А. Беленков, В.Г. Нейман, М.П. Селіванів та ін.: Машинобудування, 1997. – 176 с.
44. Проніков, А.С. Надійність машин/О.С. Проніков. : Машинобудування, 1978. – 592 с.

45. Крагельський, І.В. Тертя, зношування та змащення / І.В. Крагельський, В.В. Алісін // Довідник. У 2-х кн. / Машинобудування, 1978. - Кн.1. – 400 с.
46. Польцер, Г. Основи тертя та зношування / Г. Польцер, Ф. Майснер. Пров. з ним. Машинобудування, 1984. - 264 с.
47. Таненбаум, М.М. Про умови зниження активності абразивної дії при терті / М.М. Таненбаум // Теорія тертя та зносу. : Наука, 1985.
48. Бахтіаров, Н. І. Підвищення надійності роботи прецизійних пар / Н. І. Бахтіаров, В. Є. Логінов, Н. І. Лихачов. - : Машинобудування, 1985. - 286 с.
49. Бородін, І. Н. Порошкова гальванотехніка / І. Н. Бородін.- : Машинобудування, 1990. - 218 с.
50. Браутман, Л. А. Композиційні матеріали / Л. А. Браутман, Р. В. Крок. - : Мир, 1981. - 672 с.
51. Величко, С. А. Шляхи підвищення міжремонтного ресурсу силових гідроциліндрів / С. А. Величко, П. В. Сенін, П. В. Чумаков // Ремонт. Відновлення. Модернізація. - 2015. - № 4. - С. 36-41.
52. Газотермічне напилення композиційних порошків / А.Я. Кулік, М.Д. Нікітін та ін. - : Машинобудування, 1985. - 199 с. : Ил.
53. Гальванічні покриття в машинобудуванні: довідник. У 2-х т. Т. 1 / Під ред. М.А. Шлугера, Л.Д. Струму. - М. : Машинобудування, 1985. - 248 с., Ил.
54. Нікітін, О.Ф. Надійність, діагностика та експлуатація гідроприводу мобільних об'єктів. // Нікітін О.Ф. - Навч. посібник. - Вид-во МДТУ ім. Н.Е.Баумана, 2007.- 312 с.: Ил.
55. Дидур, В. А. Диагностика и обеспечение надежности гидроприводов сельскохозяйственных машин / В. А. Дидур, В. Я. Ефремов. Киев : Техніка, 1986. – 128 с.
56. Алексеева, Т.В. Технічна діагностика гідравлічних приводів. // Т.В. Алексеева, В.Д. Бабанська, Т.М. Башта та ін. За заг. ред. Т.М. Башти. - Машинобудування, 1989. - 264 с.: іл.
57. Хазаров, А.М. Технічна діагностика гідроприводів машин. // А.М. Хазаров – Машинобудування 1979. – 112 с.

58. F. Kh. Burumkulov, P. V. Senin, S. A. Velichko , V. I. Ivanov, P. A. Ionov i M. A. Okin. 65 G and Sv 08. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, Volume 45, 16 лютого 2010 р. (США).
59. Гаркунов, Д.М. Триботехніка // Д.М. Гаркунов – М.: Машинобудування. 1985. – 424 с.
60. Larshin V., Lishchenko N., Lysyi O., Uminsky S. (2021) Intelligent Numerical Control of Profile Grinding. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_21)  
Print ISBN978-3-030-77718-0, Online ISBN978-3-030-77719-7 Online ISBN978-3-030-77719-7 <https://dsmie.sumdu.edu.ua/schedule/proceedings.html>
61. Жачкін, С.Ю. Відновлення деталей дисперсно-зміцненим композитним хромовим покриттям/С.Ю. Жачкін // Трактори та сільськогосподарські машини. – 2005. – № 2. – С. 43-44.
62. Електронна сторінка. ЄВРОГРАНТ [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.eurogrant.ru> - Загл. з екрану.
63. Електронна сторінка. Системи автоматизації інженерних розрахунків. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.cadfem-cis.ru> - Загл. з екрану.
64. Зубченко, А.С. Марочник сталей та сплавів. 2-ге вид., дод. та випр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосків, Ю.В. Каширський та ін. За загальною ред. А.С. Зубченко – , Машинобудування. 2003. 784 с.
65. Колосків, М.М. Марочник сталей та сплавів / М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширський та ін. За загальною ред. А.С. Зубченко – , Машинобудування. 2001. 672 с.
66. Natalia Lishchenko, Vasily Larshin, Sergey Uminsky Modeling of the Intermittent Grinding Temperature InterPartner 2021: Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp 188-198 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_19)  
Print ISBN 978-3-030-91326-7. Online ISBN 978-3-030-91327-4



[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-91327-4\\_19](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-91327-4_19)

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-91327-4>

67. Штанов, Є.М. Кольорові матеріали та сплави / О.М. Штанов, І.А.Штанова - Вид. «Вента-2». 1994. 800 с.

68.. Триботехніка: навчальний посібник /Д.М. Гаркунов, Е.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. - 2-ге вид., Стер. - М.: КНОРУС, 2015. - 408 с.

69.Шликов, Е. С. Проволочно-вирізні електроерозійна обробка деталей після плазмової поверхневої гарту / Е. С. Шликов, Т. Р. Аблязов, Д. С. Белінін // Сучасні проблеми науки та освіти. - 2014. - №2.

70. Myshkin N. K., Petrokovets M. I. Mechanical behavior of plastics: surface properties and tribology. - New York: Marcel Dekker.-2004. - P. 57-94.

71. Olea-Mejia O, Wear Resistance and wear mechanisms in polymer plus metal composites / O. Olea-Mejia, W. Brostow, E. Buchman // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. - 2010. - Vol.10, №12. - P. 854-859.

72. Manninen M. Taivassalo V., Kallio S. On the mixture model for multiphase flow. Technical Research Centre of Finland, 1996.

73.. Krisyuk, V.V. Chemical vapor deposition of iron, iron carbides and iron nitride lms from amidinate precursors / V.V. Krisyuk, A.N. Gleizes, L. Aloui and others // De Caro D Journal of the electrochemical society. – 2010. – Vol. 157. – No. 8. – P. 454-461.

74. Wen-Cheng, J. Wei., Processing and Properties of (Mo,Cr) Oxycarbides from MOCVD / J. Wei. Wen-Cheng, Lo Ming-Hung Lo //Appl. Organometallic Chemistry. – 1998. – Vol. 12. – P. 201-220.

75. Budinski K.G. Friction, Wear, and Erosion Atlas. CRC Press, 2013. 309 p.

12. Gnecco E., Meyer E. (Eds.) Fundamentals of Friction and Wear. Springer, 2007. 713 p.

76. Bondar, A.B. Frame and control of an engineering control in engineering / A.B. Bondar, V.P. Smolentsev, A.I. Chasovskih// Addives – 2001. Oxford, 2001. P.18=28.

77. Hunt, M. The promise of intermetallics // Eng.: Mater. 1990. №3 – 107. P. 36 - 39.
218. Moriss, D.G. Creep resistance in a new alloy based on Fe<sub>3</sub>Al / D.G. Moriss, M. Mazmy, C. Nosedo // Scr. Met et Mater. 1994. №2 – 31. P. 173 - 178.
78. Safonov, S.V. Surface layer modification by electrospark alloying and coating / S.V. Safonov, V.P. Smolentsev // Nauka i studia. V international conference «Science and education» 27-28.02.2014. Premyse, 2014. P. 57-67.
79. Composition, Morphology, and Topography of Galvanic Coatings Fe-Co-W and Fe-Co-Mo / I. Y. Yermolenko [et al.] // Nanoscale Research Letters. - 2017. - Vol. 12. - No. 1. - P. 352.
80. Data on Energy-Band-Gap Characteristics of Composite Nanoparticles Obtained By Modification of the Amorphous Potassium Polytitanate in Aqueous Solutions of Transition Metal Salts / D.A. Zimnyakov [et al.] // Data in Brief. - 2016. - Vol. 7. - P. 1383-1388.
81. Insight into Physicomechanical and Tribological Properties of Copper Galvanic Coatings Formed with the Addition of Electroerosion Copper Nanopowder / E. V. Ageeva [et al.] // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. - 2017. - Vol. 58. - No. 2. - P. 161-167.
82. Safonov, S.V. The adjustment of discharge and spray in fuel injectors of aircraft engines // V.P. Smolentsev, I.I. Koptev, S.V. Safonov. Russian Aeronautics. Volume 59, Issue 4. 2017. Pp. 571-578.
83. Smolentsev, V.P. Magnetic pulse cleaning of products / V.P. Smolentsev, S.V. Safonov, E.V. Smolentsev, O.N. Fedonin// Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 124, Number 1, 2016. P. 12-41
84. Smolentsev, V.P. Stampless fabrication of sheet bars using disposable templates/ V.P. Smolentsev, S.V. Safonov, E.V. Smolentsev, O.N. Fedonin// Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 124, Number 1, 2016. P. 12-68.
85. Smolentsev, V.P. Processing of Channels in Heat Engine Filters/ V.P. Smolentsev, S.V. Safonov, V.V. Zolotarev//Procedia Engineering, 150, 2016. P. 1124-1130.

86. Sikka, V.K. Development and commercialization status of Fe<sub>3</sub>Al – based intermetallic alloys / V.K. Sikka, S. Viswanathan, C.G. McKaamey // Struct. Intermetallics: Champion. 1993. P. 26 - 30.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ЕЛЕКТРОІСКРОВОЇ ОБРОБКИ І ЇЇ ВПЛИВ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ.....	5
1.1. Фізичні процеси електроіскрової обробки.....	5
1.2. Механізм утворення поверхневого шару електроіскрової обробки.....	10
1.3. Режими процесу електроіскрового легування.....	14
1.4. Електроди для електроіскрового легування.....	17
1.5. Установки для нанесення покриттів методом електроіскрового легування.....	22
2. ВПЛИВ РЕЖИМІВ ЕІО, МАТЕРІАЛУ ЛЕГУЮЧОГО ЕЛЕКТРОДА НА ФАЗОВИЙ СКЛАД ПОКРИТТІВ.....	28
2.1. Вплив матеріалу легуючого електрода на фазовий склад покриттів, сформованих ЕІО.....	28
2.2. Вплив режимів ЕІЛ на мікротвердість і товщину формованих покриттів .....	45
3. ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ.....	55
3.1. Технологія ремонту посадочних місць під підшипники в корпусних деталях з алюмінієвих сплавів.....	55
3.2. Технологія ремонту алюмінієвих деталей.....	64
3.3. Технологія відновлення валу електроіскровим легуванням.....	69
3.4. Відновлення блоку і головки блоку циліндрів дизельних двигунів.....	75
3.5. Дослідження абразивних можливостей покриттів, отриманих за допомогою електроіскрового легування на алюмінієвому сплаві Д1.....	83
3.6. Застосування електроіскрових покриттів при відновленні вузлів гідрообладнання.....	86

4. ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИЙ ПРОЦЕС.....	128
4.1. Модифікація поверхневого шару без зміни його геометрії.....	128
4.2. Покриття електроерозійним методом шарами макротовщини ....	131
4.3. Електроерозійне зміцнення серед рідких газів.....	133
4.4. Технологічний процес модифікації поверхневого шару без видалення припуску.....	135
4.5. Усунення поверхневих дефектів у каналах цілісних фільтрів.....	143
4.6. Проектування процесів удосконалення поверхневого шару при ремонті та відновленні експлуатаційних властивостей виробів...	148
4.7. Технологічний процес перетворення геометрії деталі шляхом керування електричним полем.....	158
4.8. Вплив технологічних режимів зміцнення із нанесенням покриття на експлуатаційні показники виробів.....	159
4.9. Експлуатаційні характеристики деталей з тонким шаром електроерозійного покриття.....	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	172