

НУБІП України

НУБІП України

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**01.12 – КМР. 1855 “С” 2020.11.25. 013 ПЗ**

**ВЕДМЕДЕНКО РОМАН ІГОРОВИЧ**

**2021 р.**

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
Факультет (НИ) Конструювання та дизайну

УДК 621.431.73.004

ПОГОДЖЕНО ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
Дека́н факультету Завідувач кафедри  
Конструювання та дизайну Надійності техніки  
(назва факультету) (назва кафедри)

Ружи́ло З.В.  
(підпис) (ПІБ)

Нови́цький А.В.  
(підпис) (ПІБ)

“ ” 2021 р. “ ” 2021 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
на тему «Удосконалення технології відновлення зношених отворів  
чавунних корпусів гідророзподільників електроіскровим наплавленням»

Спеціальність 133 – «Галузеве машинобудування»  
(код і назва)  
Освітня програма «Машини та обладнання сільськогосподарського  
виробництва»  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми  
Д.Т.Н., професор Ромасевич Ю.О.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівники магістерської кваліфікаційної роботи:

К.Т.Н., доцент Банний О.О.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)  
Виконав: Велмеденко Р.І.  
(підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ - 2021

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**  
Факультет (НИ) Конструювання та дизайну

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри Надійності техніки**

(назва кафедри)

к.т.н., доцент

(підпис)

Новицький А.В.

(ПІБ)

2020 р.

**ЗАВДАННЯ**

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Ведмеденко Роман Ігорович

(прізвище, ім'я, по бацькові)

Спеціальність

133 – «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

Освітня програма

«Машини та обладнання сільськогосподарського  
виробництва»

(назва)

Орієнтація освітньої програми

освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи: « Удосконалення технології відновлення зношених  
отворів чавунних корпусів гідророзподільників електроіскровим  
наплавленням.»

затверджена наказом ректора НУБіП України від 25 листопада 2020р.  
№ 1855 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру

2021.10.15

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи матеріали для нанесення покриття ЕІН,  
гідророзподільники, золотник гідророзподільника, корпус  
гідророзподільника. В ролі дослідженої деталі обрано зношені отвори  
чавунних гідророзподільників.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Виконати аналіз існуючих методи відновлення золотників  
гідророзподільника.
2. Визначити параметричні залежності експлуатаційних показників в  
залежності від режимів технологічного процесу відновлення.
3. Розробити математичну модель процесу відновлення і визначити  
оптимальні технологічні режими.

Дата видачі завдання “15” жовтня 2020 року

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

к.т.н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Банний О.О.

(ПІБ)

**Завдання прийняв до виконання**

(підпис)

Ведмеденко Р.І.

(прізвище та ініціали студента)

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	8
1.1 Причини порушення працездатності гідравлічних розподільників .....	8
1.2. Способи відновлення з'єднань «золотник-корпус» гідравлічних розподільників .....	17
1.3. Реалізація процесу електроіскрового наплавлення .....	21
1.4. Технологічні параметри процесу та властивості поверхонь, отриманих методом електроіскрової обробки .....	25
1.4.1. Електричні режими установок та час обробки поверхонь .....	25
1.4.2. Вибір матеріалу електрода .....	27
1.4.3. Товщина покриття .....	31
1.4.4. Рівномірність шару покриття .....	32
1.4.5. Фізико-механічні властивості покриття .....	33
1.5. Мета та завдання дослідження .....	38
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕННЯМ .....	39
2.1. Обґрунтування товщини шару металопокриття .....	39
2.2. Умови взаємодії робочих поверхонь вузла тертя «золотник - корпус» гідророзподільника та шляхи підвищення його триботехнічних властивостей .....	46
2.3. Основні теоретичні залежності процесу електроіскрового наплавлення різних матеріалів на робочі поверхні чавунних деталей .....	53
2.4. Товщина покриття та вибір режимів електроіскрового наплавлення .....	62
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	67
3.1. Програма досліджень .....	67
3.2. Методика дослідження експлуатаційних зносів та дефектів деталей з'єднання «золотник-корпус» гідророзподільників .....	67
3.3. Методика вибору режимів роботи установки та часу наплавлення поясків отворів при відновленні корпусів гідророзподільників .....	71

3.4 Методика стендових та експлуатаційних випробувань відновлених гідророзподільників.....	73
<b>РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>76</b>
4.1 Результати дослідження дефектів та зношування деталей з'єднання «золотник-корпус» гідророзподільників.....	76
4.2. Результати досліджень покриттів, отриманих методом електроіскрового наплавлення.....	80
4.3. Результати стендових та експлуатаційних випробувань відновлених гідророзподільників.....	85
<b>РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ВІДТВЕРДЖЕНЬ У КОРПУСАХ ГІДРОРОСПОДІЛЮВАЧІВ ГОЦІНКА ЙОГО ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....</b>	<b>87</b>
5.1 Розробка технологічного процесу відновлення отворів у корпусах гідророзподільників електроіскровою наплавкою.....	87
5.2. Економічне обґрунтування технології відновлення поршневого пальця	93
5.2.1 Розрахунок вартості основних виробничих фондів ... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
5.2.2 Розрахунок собівартості розбирання гідророзподільника..... <b>Ошибка!</b>	
<b>Закладка не определена.</b>	
5.2.2.1. Визначення річної оптової ціни.... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
5.2.3. Прибуток підприємства..... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
5.2.4. Рентабельність підприємства..... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
5.2.5. Коефіцієнт фондівдачі..... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
5.2.6. Продуктивність праці у розрахунку на одного працюючого..... <b>Ошибка!</b>	
<b>Закладка не определена.</b>	
5.2.7 Випуск продукції на 1м <sup>2</sup> площі..... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
5.2.8 Визначаємо величину річної економії..... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
5.3 Річний економічний ефект.....	93
5.4. Окупність капіталовкладень.....	94
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>96</b>

НУБІТ ПІДНІ  
України

НУБІТ ПІДНІ  
України

НУБІТ ПІДНІ  
України

НУБІТ ПІДНІ  
України

НУБІТ ПІДНІ  
України

НУБІТ ПІДНІ  
України

НУБІТ ПІДНІ  
України

## ВСТУП

Сучасне сільськогосподарське виробництво оснащене різноманітною складною технікою, робота якої залежить від найбільш навантажених деталей.

Ремонт сільськогосподарської техніки пов'язаний із значними витратами матеріальних, трудових та грошових коштів. Майже 40% металу витрачається на виготовлення запасних частин, які переважно визначають собівартість ремонту машин [1]. У зв'язку з цим, в даний час велика увага приділяється використанню в народному господарстві вторинних матеріальних ресурсів, оскільки їхнє максимальне залучення до народногосподарського обороту є невід'ємною частиною роботи з економії коштів.

Відомо, що деталі сучасних машин та механізмів вибраковують при дуже малих зношуваннях. Наприклад, понад 85% деталей автомобілів, тракторів та інших самохідних сільськогосподарських машин стають непридатними при зносах до 0,2-0,3 мм, тобто. при втратах маси, що становлять десять і навіть соті частки відсотка маси самих деталей. При цьому значна кількість елементів і поверхонь деталей взагалі не зношується, що дозволяє дуже ефективно використовувати більшість вибракованих деталей для їх відновлення.

У сучасній сільськогосподарській техніці все ширше застосовують різні гідравлічні пристрої. Вони дозволяють підвищити продуктивність праці, покращити умови роботи механізатора.

Одним з найбільш складних та відповідальних агрегатів у гідросистемі, поряд з гідронасосами та гідроциліндрами, є гідророзподільник. Від надійності роботи залежить продуктивність гидроагрегата. Тим часом відомо, що нормативний 80%-ний ресурс гідророзподільника становить 6 тис. мотогодин, за даними рядових експлуатаційних випробувань [2], в умовах забрудненої робочої рідини становить не більше 2...3 тис. мотогодин. Дефіцит гідророзподільників як запасних частин становить понад 50% необхідної кількості [3]. Недостатньо високий ресурс гідророзподільників пояснюється переважно низькою зносостійкістю пари «золотник-корпус».

У зв'язку з цим пошук нових нестандартних технологічних рішень відновлення та підвищення зносостійкості вищезгаданого з'єднання, за рахунок покращення фізико-механічних властивостей робочих поверхонь, з використанням високотехнологічного та екологічно безпечного обладнання, є дуже актуальним завданням.

**Мета дослідження** – підвищення довговічності відремонтованих гідророзподільників шляхом розробки ефективної технології відновлення корпусів методом електроіскрової наплагжі (ЕІН).

**Об'єкт дослідження** - зношені та відновлені корпуси гідророзподільників Р75-В-024В та Р80-23.20.024 гідросистем тракторів, автомобілів, сільськогосподарських та інших машин.

Наукова новизна роботи:

- отримані розподіли зносів, еліпсності та конусності поясків отворів корпусів гідророзподільників.

- теоретично та експериментально обґрунтована можливість відновлення зношених отворів чавунних корпусів гідророзподільників ЕК 14, що забезпечує вихідний зазор з'єднання «золотник-корпус» та підвищення його довговічності;

- встановлена залежність товщини покриття від електричних режимів генераторів імпульсу струму, наплавного електрода та електромеханічних характеристик вібраторів;

- обґрунтовано зв'язок між якістю покриття та часом ЕІН за максимальної продуктивності процесу;

- визначено триботехнічні характеристики з'єднання «золотник-корпус», зношений отвір якого відновлено методом ЕІН.

Практична значущість роботи полягає у розробці нової технології відновлення отворів чавунних корпусів гідророзподільників методом ЕІН.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 12 друкованих праць, у тому числі 3 науково-дослідні звіти, що пройшли державну реєстрацію.

## РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Причини порушення працездатності гідравлічних розподільників

Сучасні трактори, комбайни, автомобілі, сільськогосподарські машини оснащуються значною кількістю гідролікованих вузлів та агрегатів. Від їх технічного стану багато в чому залежить надійність та експлуатаційні показники техніки.

Роздільно-агрегатні гідравлічні приводи тракторів, автомобілів та меліоративних машин базуються на таких основних елементах: насосі, гідророздільнику, силовому циліндрі та баку. У реальних системах є кілька силових циліндрів і навіть кілька роздільників [4,5].

У роздільно-агрегатних гідравлічних системах тракторів застосовують уніфікований клапанно-золотниковий гідравлічний роздільник із чотирьохпозиційними золотниками та допоміжними автоматичними пристроями. Роздільник служить для подачі робочої рідини від насосів до силових циліндрів і відведення її з циліндрів в бак, розвантаження насоса шляхом холодного перепуску робочої рідини в бак (при непрацюючих циліндрах), а також для захисту всієї системи від перевантаження [6].

Основними моделями вітчизняних роздільників роздільноагрегатного приводу сільськогосподарських машин [4,5] є агрегати двох типів з пропускною здатністю 75-80 л/хв восьми марок (P75-23, P80-23, P75-2, P80-2 та ін.) та з пропускною здатністю 150 л/хв чотирьох марок (P150-23-30-000, P150-13-20-000 та ін.). Літера "P" позначає роздільник, дві-три перші цифри при ній - максимальну подачу насоса в л/хв. Інші цифри позначають конструктивні варіанти. Технічні характеристики роздільників типу P75 (P80) та P150 наведені в таблиці 1.1.

Роздільники P75 та P80 встановлюються на тракторах (MT3-50/52, MT3-240, MT3-240Д, T-40, T-74 та ін), бульдозерах (Д-384, -385, -444, -449, -450, -474, -485, -15911, БО-55 та ін.), скреперах (Д-457, -461, -541), планувальниках (П-2,8, ПС-2,75), канавкопателях та зарівнювачах (К34-0,3,

КЗУ-0,3Б, КЗУ-0,3В), кротівниках, дренажно-криторних та щілинних машинах (КН-1200, КН-700, ДЩ-1,2), корчувачах (МБ та ін.) та на ряді екскаваторів.

Таблиця 1.1.

Технічні характеристики розподільників типу Р75 та Р150.

Показники	Марки розподільників			
	Р75-В1	Р75-В2	Р75-В3А	Р150-В3
Тип розподільника	Золотниково-кляпанний			
Максимальна пропускна спроможність, л/хв.	75	75	75	150
Тип золотника	Із закритим центром			
Кількість золотників	1	2	3	3
Діаметр золотників, мм	25	25	25	35*
Положення золотників	«Підйом», «опускання примусове», «плаваюче», «нейтральне»			
Фіксація золотників у положеннях «підйом», «опускання примусове» та «плаваюче»	Кульковим затиском			
Повернення золотників з положень «підйом» та «опускання примусове»	Автоматичне, при досягненні в системі заданого тиску			
Повернення золотників із положення «плаваюче»	Ручний			
Тиск спрацьовування клапана автоматичного повернення золотників у нейтральне положення, кг/см <sup>2</sup>	110-125			105-120
Тиск спрацьовування запобіжного клапана, кг/см <sup>2</sup>	130 +6			
Вага, кг	6,8	10,1	15,5	30,2

\* На тракторах С-100 та Т-100М; на тракторах К-700 – 32 мм.

Золотникові пари розподільників Р75, Р80 та Р150 конструктивно ідентичні, відрізняючись тільки розмірами, а розподільників Р75 та Р80 - повністю ідентичні за розмірами, матеріалом, механічною та термічною обробкою. Зміни внесені лише у конструкцію бустерного пристрою та додаткових отворів у корпусі гідророзподільника.

Таким чином, зношений золотниковий отвір у корпусі гідророзподільника Р75 можна розглядати як модель для відпрацювання, зрештою, технології відновлення отворів золотникових гідророзподільників вітчизняних моделей.

Надійність основних елементів вітчизняних гідроприводів значно нижча від зарубіжних. По напрацюванню на відмову гідропривід вітчизняних тракторів [7] поступається зарубіжним аналогам від 6 до 10 разів. Відмови гідроприводу становлять 3...7 % від загальної кількості відмов сільськогосподарських тракторів (МТЗ-80, ДТ-75М), 9...16 % на промислових (Т-130, ДЕТ-250) та до 30-35 % на тракторах Т-330 і комбайнах "Дон-1500", гідропривід яких більш чутливий до забруднення робочих рідин. Від 70 до 90% відмов гідроприводів тракторів та сільгоспмашин є функціональними. Від 40 до 95 % відмов, що систематично повторюються, пов'язані з втратою герметичності різного роду ущільнень і, як наслідок, інтенсивним абразивним (гідроабразивним) зносом основних сполук.

Дослідженнями щодо надійності гідророзподільників, виконаних автором спільно з Іоновим П.А. під проводом Бурумкулова Х.Ф., Лельчука Л.М. [4,8] та іншими, встановлено, що їхній ресурс в основному залежить від зносостійкості з'єднання «золотник - корпус». Коефіцієнт повторюваності дефекту пари тертя «золотник - корпус» дорівнює одиниці [3,9].

Необхідно також відзначити, що для виготовлення прецизійних пар застосовують високосортні конструкційні матеріали - золотник гідророзподільника виготовляють із сталі 15Х (цементация, загартування ТВЧ до НК.С 56...63), корпус із сірого чавуну марки СЧ21 ГОСТ 1412-79 твердістю 1. 205 НВ [10] та високі технології із застосуванням дорогого металорізального обладнання та спеціального оснащення, високоточного контрольного та вимірювального інструменту. Все це говорить про те, що технологічний процес виробництва золотникових пар є дорогим. Тому розвиток досліджень надійності цих елементів, а також відновлення

працездатності шляхом застосування сучасних технологій відновлення має важливе значення.

На надійність гідравлічних систем впливають [9]: досконалість конструкції гідроагрегатів, технологічні фактори (якість виготовлення), режим експлуатації, робочі рідини, способи захисту та очищення робочої рідини від забруднення, якість технічного обслуговування, ремонту та зберігання гідроагрегатів та ін.

Конструкторські відмови обумовлені помилками, допущеними під час проектування, порушеннями вимог ГОСТ, зниженням запасів міцності, помилками у створенні важливих схем і конструкцій приладів. Так, наприклад, золотникова пара має конструктивний недолік [11], в результаті якого при встановленні золотника в положення «підйом» його шостий поясок виходить з корпусу. Це призводить до перекосу золотника в отворі та прискорює зношування деталей.

Виробничі відмови викликаються порушенням технології виготовлення, недотриманням вимог конструкторської документації під час виготовлення, застосуванням некондиційних матеріалів та комплектуючих елементів, недостатнім контролем якості у процесі виробництва.

Аналіз конструкторської та технологічної документації показав, що найскладніше, найточніше і найбільш трудомістке при виготовленні з'єднання, що визначає довговічність роботи гідророзподільника – золотникова пара. Допуск на діаметр отвору корпусу та золотника гідророзподільника типу Р-75-В становить 0,004 мм за збереження геометричних параметрів (конусоподібності, овальності, співвісності) [12].

Конструктивні особливості отвору корпусу під золотник: велике відношення довжини діаметру ( $105/25 > 4$ ); уривчастий характер (у вигляді поясків) отвори по довжині, все це створює певні труднощі при виготовленні та відновленні прецизійних деталей. Діаметри отворів корпусу та золотників обробляють з технологічним допуском 0,08 мм з подальшим розбивкою на 20 розмірних груп при внутрішньогруповому допуску 0,004 мм. Велика кількість

розмірних груп складнос організації комплектування та збирання на заводі-виробнику та ускладнює подальший ремонт гідророзподільників.

Конструкційні та виробничі відмови, як правило, виявляються у початковий період експлуатації. Вони можуть бути виявлені також у процесі опрацювання випробувань у заводських умовах.

Експлуатаційні відмови є наслідком порушень умов роботи, на які розрахований даний привід, не дотримання обумовлених у технічній документації правил експлуатації, низької кваліфікації обслуговуючого персоналу, природного старіння та зношування [13].

Забруднення робочої рідини - одна з основних причин, що знижують такі важливі якісні показники гідроприводів, як ресурс, безвідмовність, а також точність оцінки їх технічного стану. Не менше 60 % відмов гідроприводу вітчизняних тракторів та сільгоспмашин прямо чи опосередковано пов'язане із забрудненням робочих рідин через незадовільне їх зберігання, транспортування та заправку [8].

Так, якщо забруднення мінеральних масел за її виробництві становить 2-4% рівня забрудненості у процесі експлуатації, то забрудненість нафтопродукту при транспортуванні від заводу виробника до нафтобази збільшується до 14%, а процесі зберігання на нафтобазі - до 21% [2].

Забрудненість робочої рідини, що заправляється в ємність тракторів з урахуванням брудоемності елемента, що фільтрує, повинна бути не вище 50 г/т, тобто, відповідати ДСТУ 10577-63 [14].

Ресурс гідророзподільників у лабораторних умовах значно перевищує нормативну цифру 6000 мотогодин. Ресурс гідророзподільників в експлуатаційних умовах, де забрудненість робочої рідини на один-два порядку вище, не може досягти 3000 мотогодин [2].

Дослідженнями встановлено, що забруднення вітчизняних тракторних приводів у 4 рази вищі за закордонні. Це пов'язано, зокрема, із недостатньо високою ефективністю систем фільтрації та захисту гідроприводу від забруднень. Так, наприклад, у загальній вартості гідроприводу вітчизняних

тракторів витрати на фільтри не перевищують 1%, тоді як у Японії - 2,2%, ФРН - 6,3%, Франції - 2,6%, Англії - 3,7%, а США - 4,3% [4, 8].

Надійна робота розподільників забезпечується своєчасним усуненням несправностей під час технічного обслуговування. Відомо, що через несправності розподільників типу P75 і P150, викликаних головним чином внутрішніми та зовнішніми витокami робочої рідини, відбуваються 23-42% всіх відмов гідросистем тракторів і сільгоспмашин [2].

Для визначення способу відновлення основних деталей гідророзподільника необхідно проаналізувати умови їх роботи та визначити основні причини, що спричиняють порушення працездатності.

Основне впливом геть працездатність розподільників [15] надає тертя спокою, тобто, зусилля стригання золотника з місця.

Можливими причинами підвищення тертя золотникових пар періодичної дії є:

- гідравлічне затискання золотника в гільзі через нерівномірне поле гідравлічних сил по поверхні;

- облітерація зазорів золотникової пари, що є зарощуванням зазорів поляризованими молекулами робочої рідини.

- механічне заклинювання золотника в гільзі через попадання в зазори твердих частинок, що є домішками рідини або продуктами зносу частин, що труться.

Причиною відмови золотникових розподільників також може бути підвищений витік робочої рідини через зношування кромки робочих поясів золотника та вікон гільзи. Підвищення витоків при нейтральному положенні золотникової пари перевантажує гідросистему, часте та вимушене спрацювання регулятора розвантаження насоса призводить до руйнування деталей гідроприводу.

Крім зазначених вище причин підвищення тертя золотникових пар, і як наслідок втрати працездатності, більшість авторів [3, 9, 16] зазначають, що

З'єднання «золотник-корпус» виходить з ладу внаслідок абразивного та втомного зношування, корозії, ерозії, кавітації, скоплювання.

Основними напрямками пошуку способів підвищення безвідмовності деталей рухомих з'єднань гідроагрегатів є зміна кінематики деталей вузлів тертя; зменшення діючих навантажень чи характеру їхньої дії; створення сприятливих умов взаємодії сполучених деталей при фрикційному контакті за рахунок макрогеометрії поверхонь, їх мікрошорсткості, вибору матеріалу та середовища з відповідними властивостями, включаючи ступінь фільтрації робочої рідини.

Для розробки раціональної технології відновлення та ремонту деталей гідроагрегатів вивчають їх знос та розподіл по поверхні.

Найбільш глибокі дослідження зношування золотникових пар розподільників відображені в роботах Бурумкулова Ф.Х., Лельчука Л.М. [4,8], М'ясоєдова Н.С. [11,17,18], Черкуна В.Є. [9].

На підставі проведених стендових зносних випробувань золотникових пар у роботі [17], зроблено такі висновки:

1. Зношення поверхонь, що сполучаються золотника і корпусу відбувається нерівномірно по довжині і утворює цих деталей; найбільшому зносу схильний п'ятий поясок золотника і відповідна кільцева розточка корпусу.

2. При роботі розподільника на маслі, що містить механічних домішок менше 0,04%, середнє зношування розточування корпусу більше середнього зносу золотника. При вмісті в маслі механічних домішок, що не згорають, 0,04% знос золотника і корпусу однаковий. При вмісті механічних домішок маслі близько 0,2% знос золотника перевищує знос розточування корпусу 1,7 разу. Перерозподіл зносу відбувається через гідроабразивну дію потоку рідини на пояски золотника.

3. Сили початкового тертя в золотниковій парі виникають із збільшенням тиску, що підводиться, і при тиску 100 кГс/см досягають 24 кг.

4. При роботі розподільника за циклом "підйом" - "автоматичний повернення золотника" - "примусове опускання" - "плаваюче" - "нейтральне становище" на олії з вмістом вогнетривких домішок до 0,04% знос золотника 2-2,6 мкм, знос розточування під золотник 2,3-2,9 мкм на 100 000 циклів.

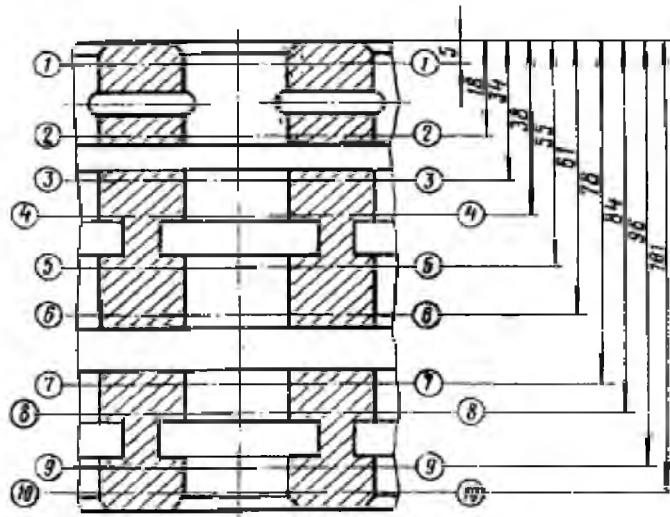
Золотникова пара за таких умов зношується до бракувальної величини за 250000 циклів.

5. Знайдено, що зазор вибракування в золотниковій парі становить  $25 \pm 2$  мкм. Вихідний зазор у цій парі становить  $10 \pm 2$  мкм, отже, сумарне зношування золотника і корпусу становить  $15 \pm 2$  мкм. При цьому корпус зношується в 1,13 рази інтенсивніше, ніж золотник. Таким чином, граничне зношування поясків золотника становить  $7 \pm 2$  мкм, а корпуси -  $8 \pm 2$  мкм.

На зношених поверхнях отвори в корпусі золотника гідророзподільника зустрічаються [9] блискуча та матова зони поясків. З'являються також сліди втомного руйнування поверхонь, подряпини та ризики глибиною до 0,12 мм, як за довжиною отвору, так і діаметром окремих поясків. Зафіксовано сколи кромок поясків отворів у корпусах гідророзподільників та золотників.

У роботі [9] дослідженнями встановлено, що при дефектації корпусу для визначення максимальної похибки геометричної форми отвору достатньо заміряти другий і третій пояски в перерізах 3-3, 4-4, 5-5, 6-6 і двох взаємно перпендикулярних площинах А-А, Б-Б (рис.1.1.).

НУБ



їни

НУБ

їни

НУБ



їни

Рисунок 1.1 - Місця виміру корпусу гідророзподільника при дефектуванні.

Максимальне значення зношування отворів у корпусі під золотник досягає 0,09 мм. У корпусів, що надходять на відновлення вперше, середнє значення зносу становить 0,025 мм. По довжині і поперечному перерізі вони зношуються нерівномірно - від 0,023 до 0,066 мм. Овальність отворів у різних

перерізах неоднакова і досягає 0,048 мм. В результаті зношування отвору корпусу та золотника зазор у з'єднанні «корпус-золотник» збільшується. Середнє значення проміжку в цьому з'єднанні становить 0,034 мм, максимальне 0,091 мм. У першого і другого

поясів ущільнювачів він дорівнює 0,026 мм, у п'ятого і шостого - 0,040 мм. При середньому значенні зазору 0,034 мм виток робочої рідини при нейтральному положенні золотника, тиску в системі 10 МПа і температурі 50 С становить 3,4 см/с, при максимальному зазорі 0,091 мм - 41,6 см/с [9].

Внаслідок мікрометражних досліджень зносів золотникових пар гідророзподільників Тихонов А.А. [3] отримав кілька відмінних даних від попередніх дослідників. Так, наприклад, встановити суттєву різницю у

величини зносу) поясків отворів корпусу і золотників за їх порядковими номерами не вдалося. В результаті проведених вимірювань встановлено, що зношування отворів корпусу під золотники лежить в межах 0,030-0,150 мм. Зношування золотників - в межах 0,008-0,144 мм.

Зазор між золотниками та корпусом у розподільниках, що надійшли на ремонт, лежить у межах 0,012-0,150 мм, при середньому значенні 0,074 мм.

Аналіз результатів мікрометражних досліджень низки авторів дозволяє зробити висновок, що максимальні та середні значення величин зношування, відхилень форми деталей з'єднання, зазорів - вельми суперечливі. Для подальших досліджень та розробки технологічного процесу відновлення золотникових отворів у корпусах гідророзподільників необхідно вивчити зношування їх робочих поверхонь та встановити основні статистичні характеристики.

## **1.2. Способи відновлення з'єднань «золотник-корпус» гідравлічних розподільників**

Розробка перспективної технології відновлення працездатності гідророзподільників передбачає глибокий аналіз робіт, проведених у цьому напрямку. Необхідність такого аналізу диктується тим, що запропоновані методи відновлення не знаходять широкого застосування ремонтних підприємствах України.

Слід зазначити, що, як правило, запропонований метод відновлення далеко не завжди відповідає вимогам до з'єднання з точки зору відповідності виду покриття протистояти провідному виду зносу, а звідси, як наслідок, виходить низький ресурс відновленого вузла. Часто перевага обраного методу втрачає свою практичну значущість через економічну недоцільність або технологічну складність його реалізації. Можна виділити три основні напрями відновлення працездатності з'єднань «золотник-корпус», що існують в даний час.

Першим і найпоширенішим напрямом при відновленні працездатності цих пар є перекомплектування. Відновлення перекомплектування має ряд істотних недоліків: використовуються тільки 30-35% ремфонду [3,19]; ресурс гідророзподільників відремонтованих перекомплектуванням має дуже низький ресурс, що підтверджується практикою та дослідженнями інших авторів [9]. Таким чином, велика частина ремфонду потребує нарощування розмірів поєсків.

Другий напрямок включає відновлення деталей пластичним деформуванням. Дана технологія відновлення золотників [20] також має недоліки, а саме: необхідно застосовувати складне обладнання та майже всі процеси, що використовуються при виготовленні серійного золотника; технологія не забезпечує значного збільшення ресурсу відремонтованих гідророзподільників; велика енергоємність процесу.

Третій напрямок поєднує способи, які дозволяють збільшити розміри відновлюваних виробів нанесенням різних покриттів, тим самим компенсуючи знос. В даний час використовуються або пройшли виробничі випробування такі технології відновлення золотників як: залізнення, хромування, лазерна технологія, плазмове та детонаційне напилення, наплавлення наморожуванням, газофазна металізація, алітування в порошкових сумішах, ЕН та ін.

Всім переліченим вище методам притаманні суттєві недоліки, які стримують застосування їх на ремонтно-механічних підприємствах, це: складність і дорожнеча технологічного процесу; потреба у висококваліфікованому обслуговувальному персоналі, висока енергоємність процесів, екологічна небезпека, ефективність при масовому відновленні деталей, гальваніка і плазма при відновленні деталей призводять до виникнення так званого «кромкового ефекту» і, як наслідок, до відсотка шлюбу.

За даними роботи [8] традиційні методи відновлення створюють важливі труднощі стосовно деталей з малими зносами, необхідна розробка

рекомендацій щодо відновлення зношених отворів корпусів розподільників. Крім того, розроблена технологія відновлення отворів у корпусах гідророзподільників може бути пов'язана з комбінацією методів ув'язаних в один і той же технологічний ланцюжок.

Для вирішення поставленої задачі необхідний метод, що забезпечує: локальність обробки, відсутність нагріву деталі, можливість нанесення необхідних зносостійких покриттів з високою міцністю зчеплення з основою, що забезпечує низьку енергоємність та простоту здійснення технологічних операцій. Необхідне надійне, малогабаритне та транспортабельне обладнання.

Таким методом є електроіскрова наплавлення (ЕІН). До недоліків процесу слід віднести обмеження товщини одержуваних шарів, неможливість використання струмопровідних матеріалів, висока шорсткість покриттів ( $Ra= 2,5-35$  мкм). Незважаючи на зазначені недоліки, технологія ЕІН останнім часом привертає все більшу увагу дослідників, і все ширше застосовується у різних сферах виробництва. Слід зазначити, що цей процес практично не вивчений щодо обробки наскрізних отворів в деталях з чавуну.

Більшість параметрів якості поверхневого шару деталей направлено на фінішних етапах технологічної обробки [21]. Кінцевими операціями з обробки деталей гідророзподільників можуть бути: чистове хонінгування або доведення під час обробки отворів корпусів; безцентрове шліфування та ручне доведення при обробці золотників.

Дослідження показують [9], що алмазне хонінгування, при масовому ремонті, забезпечує високу продуктивність і стабільну якість обробки, крім того, за своїми техніко-економічними показниками значно перевершує інші методи чистової обробки глибоких і тонких отворів (розгортання, тонке розточування, внутрішнє шліфування хонінгування абразивними брусками).

Зіставлення процесів алмазного та абразивного хонінгування показало [22], що обробка абразивними брусками незначно покращує геометричну форму отворів, проте шорсткість поверхні на один клас вища. Крім цього встановлено, що алмазне хонінгування не знижує мікротвердості

поверхнього шару та виключає появу мікротріщин, що іноді спостерігається при абразивному хонінгуванні.

У Мелітопольському інституті механізації та електрифікації сільського господарства алмазне хонінгування використовувалось при дослідженні найбільш оптимальної обробки. У результаті була розроблена технологія обробки отворів корпусів гідророзподільників алмазним хонінгуванням під п'ять ремонтних розмірів.

Однак аналіз запропонованої технології показав, що даний технологічний процес ефективний тільки при масовому та великосерійному типі виробництва, оскільки передбачається використання дорогого обладнання, спеціального високоточного технологічного реначення та складного різального інструменту. У той час як більшість ремонтних підприємств віддають перевагу універсальному обладнанню через невелику програму ремонту деталей однієї номенклатури.

Доведення, як завершальна операція, включається до технологічного процесу відновлення всіх прецизійних деталей гідроприводу для сталевих і чавунних пар [23]. Доведення виконується в середовищі мастила за допомогою дрібнозернистого вільного абразивного порошку. Ця операція

забезпечує отримання шорсткості в межах 8-10 класів чистоти та точні

геометричні розміри деталі. Доведення ведеться при малих швидкостях і при змінному русі довідного інструменту - званого притир, щодо запотівлі. Цим забезпечується неповторність траєкторій абразивних зерен, що виробляють різання при доведенні, а, отже, і зниження шорсткості поверхні. Залежно від необхідної точності та шорсткості поверхні (від ступеня зернистості порошків,

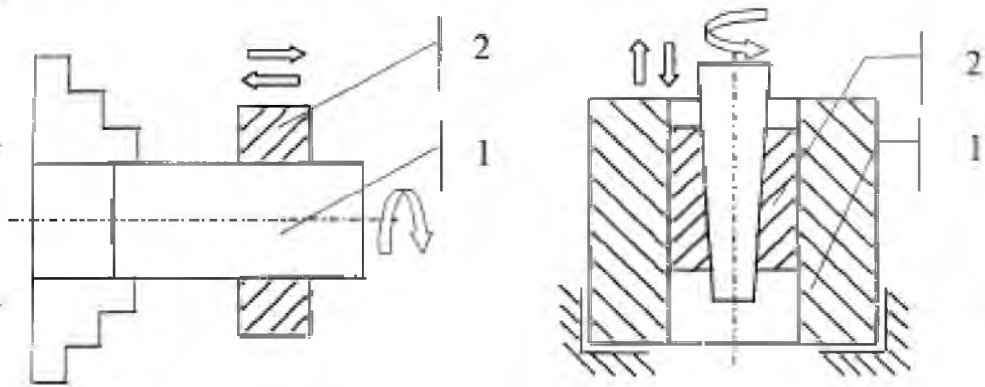
що застосовуються) процес доведення поділяють на попередній і остаточний.

Остаточне доведення близьке до полірування, абразивні зерна знімають тільки шар оксидів, не торкаючись основного матеріалу. Продуктивність (знімання

металу) при доведенні залежить головним чином від зернистості матеріалу, притирання, тривалості, швидкості відносного переміщення і тиску при

доведенні [23]. Схеми відносного руху притиру та заготівлі показані на рис. 1.2.

Проведені нами дослідження показують, що для сучасного виробництва де переважають дрібносерій та індивідуальний ремонт, прийнята для знеособленого ремонту методика не придатна [24]. Для таких виробництв підбір пар тертя необхідно здійснювати виходячи з правил функціональної взаємозамінності.



1 – деталь; 2 – притір.

Рисунок 1.2. Схеми доведення деталей з'єднання "золотник-корпус".

Розв'язанням даної задачі було б достатньо нанесення на зношені робочі поверхні металопокриттів, при цьому підбравши їх фізикомеханічні властивості таким чином, щоб підняти ресурс корпусу не менше ніж в 1,5 рази. З сучасних методів наплавлення поставленої задачі найкраще відповідає метод ЕН.

Як фінішну обробку для забезпечення високої точності отворів корпусів гідророзподільників найбільш доцільно застосувати довідкову операцію, що повністю задовольняє сучасне ремонтне виробництво.

### 1.3. Реалізація процесу електроіскрового наплавлення

Метод електроіскрової обробки металів був запропонований у 1943 році Б.Р. Лазаренко [25] та Н.І. Лазаренка. Інтерпретація багатьох фізичних явищ,

що спостерігаються при електроіскровому легуванні, базується на фундаментальних дослідженнях електричної ерозії, виконаних Б.М. Золотих [26-31], І.Г. Некрашевичем та І.А. Бакуто [32-35], К.К. Намітоковим [36,37], Б.А. Барвом [38] та ін [39-41].

Процес електроіскрової обробки металевих поверхонь ґрунтується на використанні дії імпульсного електричного розряду, що проходить між електродами в газовому середовищі. Сутність його полягає в тому, що при іскровому розряді в газовому середовищі відбувається переважне руйнування матеріалу електрода (анода) та перенесення продуктів ерозії на поверхню деталі (катод).

Різновиди електроіскрової обробки робочих поверхонь деталей можна розділити умовно на три [42]: наплавлення [16], легування [43-49] та зміцнення [50-56].

Основою наплавлення обробки зношених поверхонь деталей є нанесення покриттів товщиною, що перевищує величину зносу, і властивостями, близькими або поліпшеними по відношенню до матеріалу деталі, що забезпечує надання їх зношеним елементам втрачених розмірів.

Основою легуючої обробки робочих поверхонь деталей машин, приладів та апаратів, електричних контактів є цілеспрямована зміна рельєфу поверхні, що найбільш повно відповідає умовам контакту деталей, фізичних та механічних властивостей приповерхневих шарів матеріалів, з тим, щоб підвищити прироблюваність, задиростійкість, зносостійкість, жаростійкість, теплостійкість, електричний опір і т.д. різних з'єднань.

Основою зміцнюючої обробки робочих поверхонь деталей, штампової оснастки та ріжучих кромek інструментів є загартування та створення поверхневих шарів з покращеними експлуатаційними властивостями. Крім того, зміцнюючій обробці піддаються робочі поверхні деталей, що зазнали високотемпературної відпустки, на яких у процесі експлуатації з'явилися втомні пошкодження або сліди задирки.

В умовах виробництва наплавлення, легування та зміцнення може відбуватися як єдиний технологічний процес і як самостійний, залежно від поставленого завдання.

Для здійснення будь-якої технології головну та вирішальну роль відіграє технічне оснащення, за допомогою якого виконуються технологічні операції.

Технічне оснащення електроіскрового зміцнення складається з електроіскрового апарату або установки, що є основним обладнанням для здійснення цього процесу; комутувального пристрою анода з катодом і пристосування для затискання деталі, що обробляється.

За минулі роки застосування електроіскрової обробки різними підприємствами розроблено значну кількість різних типів електроіскрових установок. Опис цих установок дано у низці літературних джерел [57-59].

Перші установки для ЕІН були розроблені та виготовлені під керівництвом авторів методу Б.Р. Лазаренко та Н.І. Лазаренка. Ці установки були зібрані за РС - схемою, а комутація розрядного ланцюга здійснювалася ручним інструментом, що вібрує електродом.

Установки відрізнялися низькою напругою на електродах (50В), великим робочим струмом (30А і більше), значною ємністю конденсаторних батарей ( $6 \cdot 10^{-4}$  і більше) [58] та застосовувалися для грубого електроіскрового легування.

Починаючи з 60-х років Інститут прикладної фізики АН МАН СРСР та його Досвідчений завод розробили, а останній випускав невеликими партіями установки для електроіскрового легування типу ЕФІ. Істотним недоліком цього типу установок є низька надійність та стабільність роботи, вузький діапазон режимів обробки, велика маса та габарити. Ці установки особливо ефективні при зміцненні поверхонь, до шорсткості яких не висувуються високі вимоги ( $Rz \approx 80$  мкм і більше).

Ряд зарубіжних фірм випускає установки для «чистового» легування [59]. Установки фірм США, Італії, Швейцарії, Японії мають нерозібраний генератор імпульсів, зібраний за схемою РС. Для комутації міжелектродного

проміжку використовується електромагнітний вібратор, в електротримачі якого закріплюється легуючий електрод. Продуктивність процесу ЕІЛ з ручним вібратором 1-3 см<sup>2</sup>/хв, шорсткість поверхні мінімальна Ra=2,0-20 мкм.

Хоча традиційно розрізняють установки для чистового та грубого електроіскрового легування, але існує також ряд установок, що перекривають своїми параметрами межу між цими основними групами - Елітрон-22БМ, Елітрон-52БМ, Вестрон 006.

Модернізовані установки «Елітрон-22БМ», «Елітрон-52БМ» з комплектом обробних пристроїв, установкою «Елітрон-14А» призначені для електроімпульсного наплавлення, зміцнення та легування робочих поверхонь деталей машин, ріжучих кромок інструментів та штампового оснащення з метою відновлення деформованих розмірів, а також підвищення їх зносостійкості, задиростійкості, корозійної стійкості, теплостійкості та жаростійкості.

Установка "Елітрон-52БМ" має три види джерела струму: тиристорно-транзисторний (ТТ) з дев'ятьма енергетичними режимами (робочий струм 0,5-11,5 А, при напрузі 30-90 В), резистивно-ємнісний (RC) з трьома енергетичними режимами (струм короткого замикання 24-112А, при напрузі 40-60В) та суміщений резистивно-ємнісний (RC) + тиристорнотранзисторний (ТТ) з двома енергетичними режимами (струм короткого замикання 51-111 А, при напрузі 40-95В).

Установка «Елітрон-22БМ» більш тонкого призначення. Вона має ТТ джерело струму з п'ятьма енергетичними режимами (робочий струм 0,3-3,8 А, при напрузі 45-96В) і регульовану частоту подачі імпульсів 100-350 Гц.

Електроіскрова обробка робочих поверхонь деталей проводиться в основному з використанням двох типів релаксаційних генераторів імпульсу струму: резистивно-ємнісного (RC) та тиристорно-транзисторного (ТТ) [75].

Дослідження параметрів покриття завданого при спільній роботі двох джерел струму RC+ТТ показали, що в середньому товщина покриття та

шорсткість зменшуються на сім відсотків, а витрата електродів зростає майже до двох разів, при деякому збільшенні суцільності покриття.

Це з тим, що середній робочий струм і енергія розряду не змінюються, а збільшується лише струм короткого замикання до двох раз. На зростання продуктивності процесу нанесення покриття суміщений режим суттєвого впливу не вплинув.

Як було зазначено вище, для здійснення безперервного процесу ЕІН необхідна періодична комутація анода з катодом. Реалізується це за допомогою різних пристроїв, наприклад вібраторів, дисків, що обертаються, або дисків з розташованими по його периметру електродами у вигляді пластин або тяганини, які можуть бути в площині обертання або перпендикулярно до неї, а також стрижневих торцевих електродів, що обертаються навколо своєї осі і контактують з катодом за рахунок вібрації або вертикальної подачі автоматичного регулювання міжелектродного проміжку.

Використання того чи іншого комутуючого пристрою обумовлено призначенням установки, її загальною конструкцією та електричними режимами електроіскрової обробки. Так, для ручних установок ЕІН доцільно використовувати вібратори із частотою вібрації 100-400 Гц [57].

Наприкінці слід зазначити, що представлений у даному параграфі матеріал дозволяє зробити висновок, про те, що сучасне обладнання для електроіскрової обробки повною мірою забезпечує технологічні можливості, необхідні для отримання якісних шарів заданої товщини для відновлення отворів корпусів гідророзподільників.

## **1.4. Технологічні параметри процесу та властивості поверхонь, отриманих методом електроіскрової обробки**

### **1.4.1. Електричні режими установок та час обробки поверхонь**

Сучасні установки для ЕІН типу «Елітрон» мають широкий діапазон електричних режимів, яким відповідають певні значення середніх робочих струмів та їх розподіл, а також ємності накопичувальних конденсаторів [74].

Струм характеризує потужність режиму, ємність - енергію. Одиничного розряду режиму установки при заданій напрузі на накопичувальних конденсаторах.

Зміна електричного режиму роботи установки, відбиваючись у зміні енергії одиничного імпульсу, дозволяє керувати якісними та кількісними характеристиками покриття, що наноситься - його товщиною, мікротвердістю, шорсткістю, розмірами нерівностей поверхні. Зі збільшенням електричного режиму та робочого струму товщина та шорсткість покриття зростає.

Слід мати на увазі, що певною перевагою мають м'які режими обробки, до яких умовно можна віднести режими з робочим струмом до 1,5 А. При їх використанні має місце дуже невелика товщина покриття перехідного шару, а сам нанесений шар найбільш щільний і його поверхня найменш шорстка. Відсутність перехідного шару і низька шорсткість поверхні іноді мають вирішальне значення при виборі режимів обробки. Тому часто виявляється доцільним віддавати перевагу тонким шарам покриттів, ніж товстим, що є зазвичай пористішими і крихкими.

Зі зростанням електричного режиму підвищуються також продуктивність нанесення покриття, кількість перенесеного на оброблювану поверхню електродного матеріалу і, відповідно, витрата електрода - Дт~.

Варіювання електричними режимами призводить до зміни мікротвердості покриттів. При цьому характерно, що ЕІО твердосплавними електродами зі збільшенням енергії електричного режиму обробки призводить до зниження мікротвердості поверхні легування на 20 ... 30%.

Час ЕІО суттєво впливає на якісні характеристики покриттів, особливо при використанні електродів із твердих сплавів, які значно відрізняються за хімічним складом від матеріалу оброблюваних деталей.

У процесі обробки зі збільшенням її тривалості поступово вихідна поверхню деталей набуває новий специфічний рельєф, тобто. все нові ділянки поверхні деталі виявляються підданими дії іскрових розрядів, у тому числі й ділянки, у яких вже є елементи матеріалу електрода. Таким чином,

Збільшується суцільність покриття. У цю назву входить поняття наявності або відсутності наскрізних каналів, що проходять від поверхні шару до основного металу. Воно відрізняється від поняття пористості шару, під яким розуміється наявність або відсутність закритих мікропор у наплавленому шарі.

При ЕЮ в повітрі важко отримання шару без перепусток. Вони викликані утворенням окисних частинок або випадковим перепусткою. На суцільність шару впливає стан поверхні перед обробкою. Якщо на оброблюваній поверхні є точкові окисні плівки, іржа, глибокі подряпини, вибоїни, каверни, оспинки, це негативно впливає на суцільність шару і збільшує час обробки.

Зі збільшенням потужності режиму (величини робочого струму) установки отримання суцільного покриття досягається менший час, тобто продуктивність нанесення покриття зростає.

Практично якість покриття і його товщина залежать від точності дотримання електричних, вібраційних і тимчасових характеристик технологічного процесу.

#### **1.4.2. Вибір матеріалу електрода**

Ефективність ЕН багато в чому обумовлена вибором матеріалу, з якого формується покриття. Як матеріал електрода при ЕЮ можуть застосовуватися більшість струмопровідних матеріалів: чисті метали та їх сплави; карбіди, нітриди, бориди та ін. з'єднання тугоплавких перехідних металів; тверді сплави, композиційні матеріали та ін [59].

Застосування того чи іншого матеріалу електрода дозволяє надати поверхневому шару виробу, що обробляється експлуатаційні властивості [77], близькі до властивостей електродного матеріалу. У таблиці 1.2 наведено відомості про види електродних матеріалів, що застосовуються.

Таблиця 1.2.

Електродні матеріали, що застосовуються для ЕІН

Електродні матеріали

I група – тверді з'єднання та сплави	II група – м'які метали та їх сплави	III група - інші струмопровідні матеріали
1. Карбіди, нітриди, бориди та інші тверді з'єднання металів. 2. Вольфрамо-місткі сплави 3. Безвольфрамові тверді сплави	1. Метали: - алюміній; - мідь; - срібло; - Золото; - свинець; - олово; 2. Сплави: - латуні, - бронзи та ін.	1. Чисті метали: вольфрам, хром, молибден та ін. 2. Феросплави. 3. Стали вуглецеві та леговані. 4. Чавуни. 5. Графіт

До першої групи матеріалів відносять карбідні, нітридні, боридні, керметні сполуки тугоплавких металів, які можуть мати невелику кількість металеві зв'язки. Сюди відносяться широке коло металокерамічних твердих сплавів: вольфрамокобальтових (типу ВК), титановольфрамокобальтових (типу ТК), титанотанталовольфрамокобальтових (типу ТТК), склад яких регламентований ГОСТ 3882-74, а конструкція та розміри 2 Г2 Г2 До цієї групи належать і ряд марок твердих безвольфрамових сплавів типу ТН-20, КНТ-16, І-3, які за своїми характеристиками близькі до сплавів групи ТК.

Матеріали першої групи утворюють хороший шар покриття і внаслідок їх невеликої хімічної активності найменш чутливі до складу навколишнього середовища та матеріалу виробу. Такі покриття мають мінімальну схильність до схоплювання при терті (особливо якщо застосовувані матеріали не мають металеві зв'язки). Вони надають поверхні високу твердість і зносостійкість, що дуже бажано поверхні тертя. Однак їх порівняно високий коефіцієнт тертя від 03 до 07 не завжди дозволяє застосовувати ці покриття для деталей тертя без додаткової обробки, яка знижує коефіцієнт тертя.

До другої групи електродних матеріалів відносять м'які метали та їх сплави (алюміній, мідь, срібло, золото, свинець, олово). Перевага нанесення

покриттів матеріалами другої групи методом ЕІО перед іншими способами полягає у високій міцності зчеплення покриття з основою (до 60 МПа) та можливості нанесення цих матеріалів у заключній стадії обробки виробу без будь-якого впливу на інші частини його поверхні.

В результаті нанесення названих матеріалів на поверхню, що обробляється, утворюється м'який антифрикційний шар, який, знижуючи коефіцієнт тертя пар ковзання, збільшує надійність роботи з'єднання. Крім того, покриття цими матеріалами мають високу електропровідність, що має важливе значення для відновлення контактів деталей електроапаратури, а легування алюмінієм збільшує твердість, антикорозійну стійкість і жаростійкість поверхонь виробу.

До третьої групи електродних матеріалів (токопровідних матеріалів) відносять решту металів (вольфрам, титан, молібден, хром, нікель) і сплави на їх основі, включаючи феросплави, широкую номенклатуру сталей, чавуни, а також кремній і графіти. Тут спостерігається велика відмінність у здатності металів осідати на виробі при електроіскрових розрядах, що обумовлюється як властивостями самих цих матеріалів, так і їх чутливістю до хімічного складу матеріалу виробу, що обробляється. Значно відрізняються і експлуатаційні характеристики покриттів, що формуються, наприклад:

- вольфрам - добре наноситься на струмопровідний матеріал широкому діапазоні електричних режимів, але покриття виходить нерівномірним по товщині і електрод зазвичай «заліпає», тобто, як би приварюється до виробу при кожному розряді. Покриття має високі зносо- та теплостійкість;

- титан - процес ЕІО протікає стійко. Утворюється рівний, але відносно тонкий шар зносо- та корозійно-стійкого покриття;

- молібден - утворює рівномірне покриття на слаболегованих та хромистих сталях. На високолегованих нікелевих сплавах утворює рівномірний, але тонкий, в основному дифузний шар. Найкращі покриття цим металом виходять при використанні режимів із малою або середньою енергією імпульсів. Покриття володіють високими зносо- і корозійною стійкістю;

- хром - при обробці різних за складом матеріалів виробів утворює хороше за кількістю перенесеного металу, суцільне і рівномірне покриття, що володіє високими зносо-і жаростійкістю;

- нікель - процес ЕІО супроводжується залипанням електрода до виробу, покриття нерівномірно за товщиною, але йому притаманні підвищені жаро- та корозійна стійкість;

- феросплави - при обробці ЕІО металів і сплавів на основі заліза електроди з феросплавів (наприклад, ферротитан) дозволяють наносити покриття з властивостями, близькими властивостям покриттів з монометалу,

що є вихідним по відношенню до феросплаву (тобто титан); при цьому товщина покриття феросплавом, як правило, більша за товщину покриття з монометалу;

- сталі - внаслідок великого різноманіття сталей за хімічним складом, вони широко застосовуються як електроди переважно при відновленні розмірів багатьох деталей машин і приладів^ забезпечуючи отримання

необхідних експлуатаційних характеристик (наприклад [78], сталь 3, як підшар для відновлення зношених розмірів та зміщення деталей з чавуну);

- чавуни - процес ЕІО зазвичай протікає стабільно у всьому діапазоні електричних режимів. Електроди з чавуну можуть бути заміною електродам з вуглецевих сталей;

- графіти - обробка робочих поверхонь деталей графітовим електродом на повітрі аналогічна за ефектом процесів цементації та ціанування. Формування зміцненого шару відбувається стабільно. Характерною рисою є збереження вихідних розмірів та шорсткості робочої поверхні деталі, які при

ЕІО іншими електродними матеріалами зазвичай змінюються.

Призначення електроіскрових шарів та умови експлуатації оброблених деталей в основному і визначають вибір матеріалу, що наноситься. При ЕІО за інших рівних умов перевага надається тому електродному матеріалу, ерозія та

коефіцієнт перенесення якого при заданій енергії розряду максимальні.

При ЕІО великий вплив формування покриття та її якості надає площа перерізу електрода. Це пов'язано як із зміною температурного режиму роботи електрода, так і щільності імпульсного технологічного струму, що проходить через нього.

### 1.4.3. Товщина покриття

Макимально можливе перенесення матеріалу електрода на робочу поверхню оброблюваної деталі різний для різних поєднань матеріалів та сплавів, з яких складаються деталь (катод) та електрод (анод). При «чистовій» обробці (товщина наплавлення становить до 0,2 мм), процес ЕІО виконується на режимах 1...10 установки «Елітрон-52БМ» і на всіх режимах установки «Елітрон-22БМ», поверхня покриття виходить найбільш рівною, а матеріал деталі набуває заданих властивостей або зазнає найменшого термічного впливу. Під «чистою» обробкою розуміється спосіб відновлення зношених поверхонь у межах закладених у кресленні допусків; при цьому ЕІО є практично фінішною операцією.

При використанні режимів 11,12,13 і 14 («груба» обробка) установки «Елітрон-52 БМ» поверхня виходить нерівною, метал електрода та поверхня деталі піддаються значному термічному впливу, шар можна отримати товстий - до 1...2 мм, а іноді при нанесенні алюмінію, міді, бронзи та латуні на силумін - до 3,5 мм. Суцільність таких покриттів зазвичай не перевищує 40%. Такі покриття можна використовувати як основу для відновлення нерухомих з'єднань, корпусів гідронасосів металополімерами.

Як було зазначено, особливість ЕІО у тому, що кожного режиму обробки, матеріалів електрода і деталі, складу газової середовища, у якій відбувається обробка, існує гранична товщина наплавки.

Однією з причин є зміна вихідного хімічного складу матеріалу електрода під час перенесення його на поверхню деталі та зміна хімічного складу

поверхневого шару деталі, наприклад, збагачення наплавленого шару киснем і азотом повітря.

У безокислювальному середовищі (аргон, гелій, водень) процес нанесення покриттів суттєво покращується, але максимум, дещо зміщуючись вправо та вгору, залишається.

Друга причина, що обмежує граничну товщину покриття, пов'язана з глибокими змінами, що виникають у поверхневих шарах оброблюваної деталі: поява та накопичення дефектів кристалічних решіток, що перешкоджають дифузії; виникнення напруги; поява «пухких» поверхневих шарів, які під дією переносяться від електрода матеріалу руйнуються і несуть з поверхні деталі.

При цьому незалежно від часу обробки електрод руйнується практично за лінійним законом.

Гранична товщина покриття для кожного випадку ЕІВ встановлюється експериментальним шляхом. Товщину покриття можна збільшити шляхом нанесення багатшарових покриттів та застосування віброобертальних електродів.

#### **1.4.4. Рівномірність шару покриття**

При ЕІО в момент торкання електродом поверхні оброблюваної деталі відбувається тільки один розряд, в результаті якого на неї переноситься дуже мала кількість електродного матеріалу. Утворення шару по всій оброблюваній поверхні є результатом на неї великої кількості одиничних розрядів при постійному переміщенні легуючого електрода вздовж і поперек цієї поверхні.

Від рівномірності цього переміщення залежить рівномірність шару покриття, крім тих випадків, коли електрод залипає при контакті з поверхнею.

Як правило, електроіскрове покриття виходить досить рівномірним, оскільки за секунду обробки переноситься від 100 до 400 порцій електродного матеріалу. За даними Н.І. Лазаренка [79], наприклад, за один імпульс переноситься 7-10<sup>-3</sup> г карбіду вольфраму на третьому режимі роботи установки

"ЕФІ-10М" (приблизно шостий режим установки "Елітрон -52БМ"), отже, для нанесення покриття товщиною 20...30 мкм на площу 1 см<sup>2</sup> (з урахуванням коефіцієнта перенесення матеріалу електрода) необхідно 24...30 тисяч імпульсів та 4...5 хвилин обробки. Тому деяка немінучість нерівномірності обробки та розподілу перенесеного матеріалу помітно не відбивається на якості одержаного шару.

#### **1.4.5. Фізико-механічні властивості покриття**

Фізико-механічні властивості покриття оцінюються міцністю зчеплення покриття з матеріалом деталі, опору контактної втоми, твердістю, залишковою напругою на поверхні і перерізом наплавленого шару, зносостійкістю і здатністю матеріалу покриття не входити в схоплювання при терті, корозійної стійкістю, жаростійкістю, опір поверхні яких оброблені імпульсною електричною іскрою.

Як уже було сказано, основні характеристики шару, сформованого в результаті обробки ЕІО, значною мірою залежать від матеріалів електрода та основи, у тому числі від виду термічної обробки, що передусє легування електричних режимів обробки.

За даними численних експериментів встановлено [57, 58], що міцність на зріз становить від 45 МПа (електрод вольфрам, матеріал Ст.3) до 95 МПа (електрод тантал, матеріал Ст.3), а міцність на відрив тих самих матеріалів від 25 МПа до 85 МПа.

Основними факторами, що визначають міцність зчеплення покриття з основою та її контактну втому є крихкість та монолітність нанесеного шару. Незважаючи на те, що електроіскрові покриття зазвичай мають деякий відсоток мікропор і часто є тендітні матеріали (наприклад, тверді сплави), міцність покриття на відрив перевищують 30 МПа. Крім цього вони витримують значні ударні навантаження та вигини, не руйнуючись і не відшаровуючись від основи.

Фазові та структурні перетворення, що відбуваються на робочих поверхнях деталей при ЕІО, супроводжуються значними об'ємними змінами, що призводить до виникнення внутрішніх залишкових напружень розтягування.

Між залишковою напругою розтягування та опором втоми деталі існує наступна залежність:

$$\sigma_{-1}^{EIO} \approx \sigma_{-1}^{необр} - \psi \sigma_{розт},$$

де  $\psi$ -коефіцієнт.

Є різні експериментальні дані про рівень зниження опору втоми деталей, робочі поверхні яких піддані ЕІО.

Величину зниження втомної міцності вказати точно не можна, так як це залежить від умов експлуатації, якості та складу наплавленого шару.

Необхідно зауважити, що відновлення методом ЕІО деталей, схильних до втомних руйнувань (колінчасті вали, поворотні кулаки, осі та ін) повинно супроводжуватися втомними випробуваннями і поверхневою пластичною обробкою.

Поверхневий шар, що утворюється в процесі ЕІО, складається зазвичай з трьох зон: зони прилиплих частинок розпиленого металу, білого шару та зони термічного впливу. Поява зони термічного впливу під білим шаром є наслідком впливу високих температур поверхневий шар основного матеріалу. Характер цієї зони значно залежить від попередньої термообробки металу основи.

При ЕІО твердими сплавами Т15К6, ТТ21К9 та ін. ніж основа. При цьому мікротвердість підшару підвищується від основи до білого шару. Це пояснюється тим, що в процесі імпульсних розрядів теплова енергія поширюється в глиб основи і відбувається своєрідне загартування внутрішніх верств. Крім цього, відбувається дифузія легуючих елементів електрода, газового середовища в глиб матеріалу, а легуючих елементів матеріалу основи до поверхневих шарів матеріалу.

При нанесенні на поверхню загартованих сталей і чавунів твердих сплавів і вольфраму, мікротвердість термодифузійного шару круто знижується від значення мікротвердості білого шару до значення меншого мікротвердості основного матеріалу, а потім підвищується до мікротвердості основного матеріалу. Це пояснюється тим, що під «білим» шаром утворюється зона вторинної відпустки та вторинного загартування.

При нанесенні на поверхню загартованих сталей і чавунів, хрому (мікротвердість 1250 МПа) або ферохрому мікротвердість «білого» шару, як правило, менша за мікротвердість загартованого шару основного матеріалу.

Це тим, що хром і ферохром, створюючи із залізом необмежені тверді розчини, утворюють лежить на поверхні сплави, мікротвердість яких менше мікротвердості загартованої сталі.

Мікротвердість термодифузійної зони спочатку зменшується, а потім зростає до значення мікротвердості загартованої основи. Це пояснюється тим, що при наплавленні хрому (ферохрому) на поверхню загартованої сталі під білим шаром відбувається вторинна відпустка і вторинна загартування.

При нанесенні на поверхню загартованих сталей і чавунів кольорових металів та їх сплавів, мікротвердість «білого» шару менша за мікротвердості зони термічного впливу та основного матеріалу. Це пояснюється тим, що під

«білим» шаром утворюється зона загартування (попередньо загартовані матеріали) або зона вторинної відпустки та вторинної загартування (попередньо загартовані матеріали).

Глибина зони термічного впливу залежить від енергії поодиноких іскрових імпульсів та зростає при її збільшенні. Зазвичай глибина цієї зони близька до товщини «білого» шару, але при малій енергії розряду може бути і значно тоншим за нього.

Хімічний склад матеріалу основи істотно впливає основні характеристики покриттів. Це тим, що на мікротвердість покриттів значно впливають легуючі елементи матеріалу основи, які концентруються в «білому» шарі. Чим більше сталі тугоплавких легуючих елементів з високою

вихідною твердістю, тим вище мікротвердість покриттів (наприклад, сталь Р6М5).

З вищевикладеного видно, що вихідну твердість металеві поверхні можна змінити так:

- підвищити, наносячи на неї матеріали вищої твердості (тверді сплави, карбіди, бориди, нітриди) або дифузійно вводячи в поверхню хімічні елементи з матеріалу електрода (вольфрам, молибден, ванадій, тантал, вуглець, алюміній та ін.) та навколишнього середовища (середовище – повітря, вуглекислий газ, азот). Наприклад, мікротвердість сталі може бути доведена до 22000 МПа, міді до 10000 МПа;

- знизити, наносячи на неї м'якіші матеріали або наносячи хром, ферохром на поверхню загартованої сталі або чавуну;

- підвищити при обробці незагартованого, але загартується матеріалу, застосовуючи імпульси з великою енергією або більш тривалі, що розігрівають метал трохи глибше сумарної товщини нанесеного і дифузійного шарів.

Експерименти, проведені попередніми дослідниками показали, що ЕІО поверхонь термічно оброблених матеріалів призводить до появи під «білим» шаром зони відпустки – зони зниженої твердості. Тоді електроіскрова обробка

може завдати шкоди, якщо допустиме зношування поверхні перевищує товщину «білого» шару.

Відновлення зношених робочих поверхонь деталей та поліпшення їх властивостей можна досягти таким чином:

1) нанесенням високозносоустійких матеріалів (для нових поверхостей утворенням зміцненого дифузійного шару) заданої товщини на зношені поверхні;

2) нанесенням м'яких антифрикційних матеріалів на відновлені поверхні або на сполучену поверхню пари тертя;

3) зміною твердості поверхонь тертя. Наприклад, упорядкуванням пари тертя за схемою:

де  $H_{\mu_1}$ ,  $H_{\mu_2}$  - відповідно, мікротвердості поверхонь золотника та отвори;

$$H_{\mu_1} < H_{\mu_2}, \text{ а } F_1 < F_2,$$

$F_1$ ,  $F_2$  - відповідно, площі поверхонь тертя золотника та отвори.

Дана схема може бути реалізована для пари тертя «золотник-корпус» шляхом нанесення зносостійкого шару підвищеної твердості на поверхню отвору та м'якого антифрикційного покриття на поясок золотника

Для деталей, що працюють на тертя, небезпечною є властивість більшості матеріалів схоплюватися в сполучених точках поверхонь, що труться (наприклад, заїдання пар: «золотник - корпус» гідророзподільника, «підшпальник - гільза», «поршень (кільце) - гільза», «вкладини підшипника - шийка валу» і т. д.). При цьому утворюються задираки, відбувається налипання металу однієї деталі на іншу та пластичне переміщення металу.

Досвід обробки робочих поверхонь деталей імпульсної електричної іскрою показує, що такі поверхні мають знижену схильність до схоплювання в порівнянні з вихідним матеріалом. Появляється це тим, що при ЕІО на поверхню наносяться матеріали, які не схильні до схоплювання. Крім цього при ЕІО поверхонь відбувається зміна їх структури, спотворення кристалічних ґрат і поява ними різних дефектів, тобто. поява сукупних факторів, що знижують поверхневу енергію. Цим пояснюється граничне значення осадження матеріалу електрода на поверхню деталі при ЕІО.

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок про необхідність провести ретельні дослідження технологічних параметрів процесу та фізико-механічних властивостей поверхонь оброблених методом електроіскрового наплавлення стосовно відновлення отворів у корпусах гідророзподільників

### 1.5. Мета та завдання дослідження

Проаналізувавши стан питання щодо працездатності, надійності, типових дефектів, зносів та методів відновлення зношених золотників та пов'язаних з ними корпусів розподільників гідросистем визначили мету дослідження – підвищення довговічності відремонтованих гідророзподільників шляхом розробки ефективної технології відновлення корпусів методом електроіскрового наплавлення (ЕІН).

Виходячи з мети дослідження, у цій роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз причин відмов деталей з'єднання «золотник-корпус» гідророзподільника. Вивчити зношування їх робочих поверхонь і встановити основні статистичні характеристики.

2. Обґрунтувати товщину покриття необхідну відновлення відношених отворів в корпусах гідрораспределителей.

3. Визначити умови взаємодії поверхонь деталей з'єднання «золотник-корпус» та встановити шляхи підвищення їх триботехнічних властивостей.

4. Дослідити фактори, що визначають товщину покриття при ЕІН та встановити критерій вибору режимів для відновлення зношених отворів гідророзподільників

5. Провести дослідження мікротвердості, мікрогеометричних та триботехнічних характеристик поверхонь оброблених електроіскровим методом.

6. На підставі лабораторних досліджень, стендових та експлуатаційних випробувань розробити технологічні рекомендації відновлення зношених корпусів гідророзподільників методом ЕІН та впровадити їх у виробництво. Визначити техніко-економічну ефективність розробленого технологічного процесу.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1. Обґрунтування товщини шару металопокриття

Більшість зношених деталей машин, нині, існують різні способи їх відновлення. При виборі способу відновлення, що забезпечує задану точність, необхідно враховувати умови (тип виробництва, наявність і величина ремфонду та ін.) в яких даний спосіб застосовується.

Як було зазначено вище, найбільш поширеним способом відновлення працездатності з'єднання «золотник – корпус» є перекомплектування. На рис.2.1 представлені функції щільності розподілу діаметрів золотника і отвори корпусу після виведення слідів зносу  $V$  виправлення геометричної форми. Аналіз даних залежностей дозволяє встановити кількість деталей, які можна відновити перекомплектуванням, без нанесення поверхневого шару. З

малюнка видно, що 91% (відрізок a-b) отворів корпусу розподільників, що надійшли на ремонт, вважатимуться придатними, оскільки їх розміри лежать у полі допуску виготовлення. У золотників знос значний, 30,5% (відрізок a-c) їх мають розміри, що виходять за межі поля допуску на виготовлення. Кількість золотників, величина яких знаходиться в полі допуску, становить 91%, що в 1,3 рази більше за кількість отворів, що сполучаються. Це говорить про невідповідність фізико-хімічних властивостей деталей цієї сполуки.

За технічними вимогами [10] зазор між золотником та отвором у корпусі повинен бути в межах 0,008-0,016 мм. З графіка видно, що для 14,5% придатних золотників (відрізок c-d) не можна підібрати отворів, що забезпечують технологічний зазор, і для 19% придатних корпусів (відрізок e-b) також не можна підібрати золотники, що забезпечують технологічний зазор у з'єднанні. Інші 55% (d-f) і 64,5% (відрізок g-e) придатних золотників і корпусів, відповідно, теж можуть бути використані все шляхом перекомплектації.

Криві функцій розподілу наочно показують, що у ділянках ідентичних розмірних груп вони мають різний нахил. Це говорить про те, що кількість

деталей для комплектування в даній розмірній групі по-різному. Наприклад, для 7 розмірної групи (25,024-25,028мм.) отвори корпусу гідророзподільника маємо 4,5% (відрізок i-h) отворів, а золотників 5,5% (відрізок j-k). Отже, всередині цієї розмірної групи 1% золотників не буде чим комплектувати. Або

для 13 розмірної групи (25,048-25,052мм.) отворів корпусу гідророзподільника маємо 6% (відрізок m-n), а золотників 1% (відрізок o-p), отже, усередині цієї розмірної групи, навпаки, 5% отворів не буде чим комплектувати.

Загалом із 69,5% золотників та 91% корпусів, розміри яких знаходяться у полі допуску на виготовлення, можна скомплектувати 34% сплук або близько 20 золотникових пар із 60 досліджуваних. Тоді інші деталі з'єднання повинні вибраковуватись або відновлюватись нанесенням шару металопокриття.

Товщина шару повинна компенсувати не тільки сумарне лінійне зношування золотника та отвору, але й припуск на виведення слідів зношування деталей з'єднання «золотник - корпус», плюс припуск на обробку відновленої поверхні, з метою зменшення шорсткості. Таким чином, шар металопокриття визначається за залежністю.

$$h = \frac{\Delta S + 2Zk_{\delta} + 2Zz_{\delta} + 2Zk_p}{2}, \quad (2.1.)$$

де  $\Delta S$  - зазор у з'єднанні «золотник-корпус», мкм

$$\Delta S = Dk_{\max} - Dz_{\min} - S_T,$$

де  $Dk_{\max}$ ,  $Dz_{\min}$  - відповідно максимальне значення діаметра отвору

корпусу та мінімальне значення діаметра золотника, мкм;

$S_T$  - середній конструктивно-технологічний зазор, мкм

$$S_T = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2},$$

$S_{\max}$ ,  $S_{\min}$  - максимальний і мінімальний зазори в поєднанні нових

деталей, мкм;

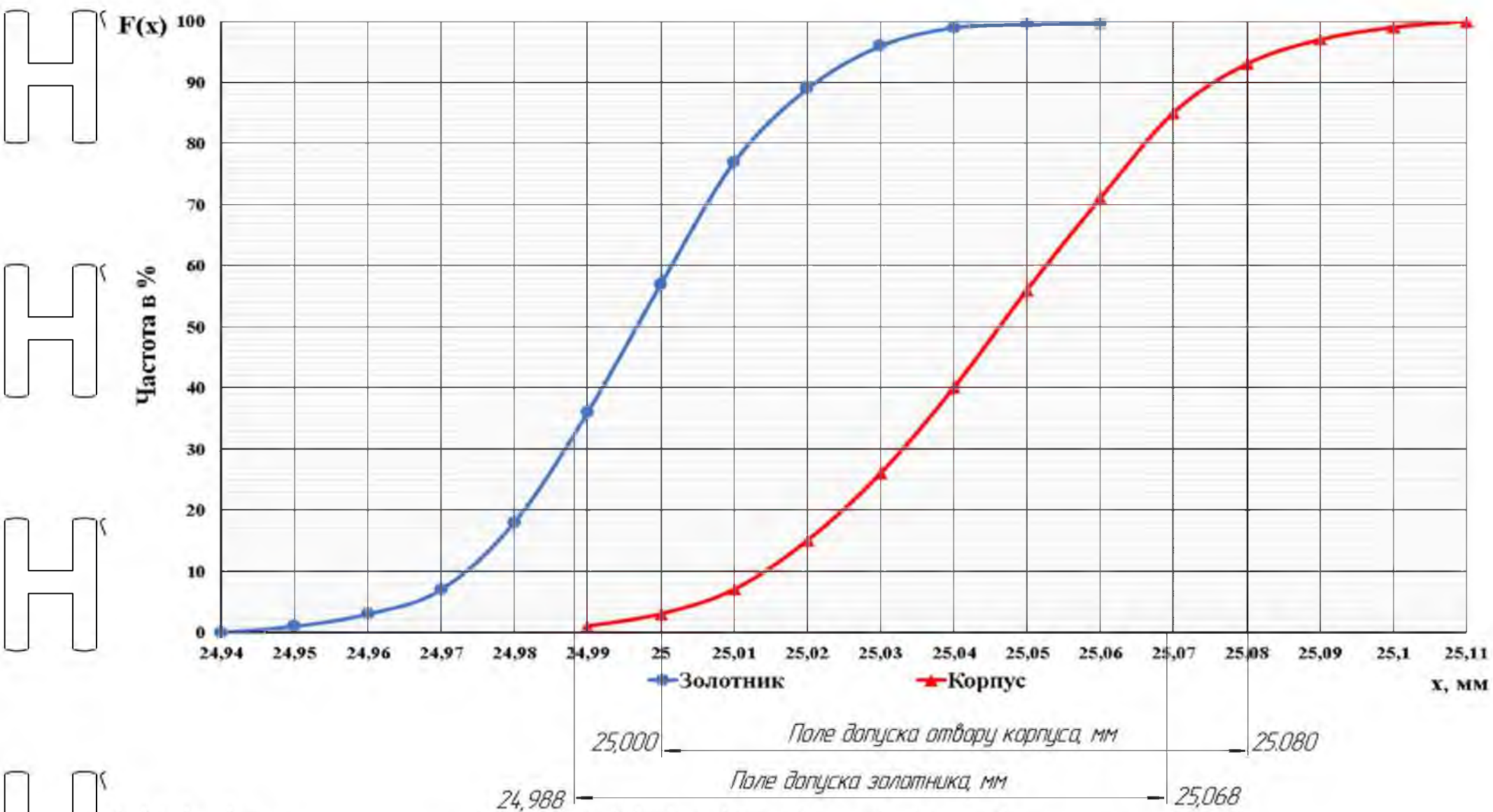


Рисунок 2.1 – Функції розподілу діаметрів золотника та отвори корпусу

НУБІУ | УКРАЇНИ

$2Z\kappa_{\delta}$ ,  $2Zz_{\delta}$  - відповідно припуски на виведення слідів зношування отвору корпусу та золотника, приймаємо на 30% більше максимальної похибки геометричної форми [9], мкм

$$2Z\kappa_{\delta} = \delta \max_{\kappa} + \delta \max_{\kappa} \cdot 0,3;$$

$$2Zz_{\delta} = \delta \max_{z} + \delta \max_{z} \cdot 0,3;$$

де  $\delta \max_{\kappa}$ ,  $\delta \max_{z}$  - відповідно максимальне відхилення геометричної форми отвору корпусу та золотника, мкм.

З метою зменшення шорсткості відновленого отвору та забезпечення технологічного зазору приймаємо мінімальний діаметральний припуск на обробку отвору корпусу ( $2Z\kappa_p$ ) рівним 20-25 мкм.

Для визначення величини шару металопокриття можна порівняти схеми зношених деталей при знеособленому (рис.2.2 а, б.) і не знеособлений (рис.

2.2 в, г) ремонтах.

При знеособленому ремонті у формулу (2.1.) підставляються значення максимальних зносів золотника і корпусу з усієї статистично досліджуваної партії з'єднань (рис.2.1.), припуски на виведення слідів зносу та виправлення геометричної форми золотника та корпусу також визначаються за максимальним значенням всієї статистично досліджуваної партії з'єднань,

тобто

$$h_{cm} = \frac{\Delta S_{cm} + 2Z\kappa_{\delta cm} + 2Zz_{\delta cm} + 2Z\kappa_p}{2} \quad (2.2.)$$

де  $\Delta S_{cm}$  - зазор без урахування нормативних вимог, статистично досліджувальної партії з'єднань, мкм

$$\Delta S_{cm} = D\kappa_{\max cm} - Dz_{\min cm} - S_{Tc}$$

де  $D\kappa_{\max cm}$ ,  $Dz_{\min cm}$  - відповідно максимальне значення діаметра отвору корпусу та мінімальне значення діаметра золотника статистично досліджуваної партії з'єднань, мкм;

$2Zk_{\delta_{cm}}$ ,  $2Zz_{\delta_{cm}}$  - відповідно припуски на виведення слідів зносу отвору корпусу і золотника статистично досліджуваної партії сполучень, приймаємо на 30% більше максимальної похибки геометричної форми [9], мкм

$$2Zk_{\delta_{cm}} = \delta \max_{k_{cm}} + \delta \max_{k_{cm}} \cdot 0,3;$$

$$2Zz_{\delta_{cm}} = \delta \max_{z_{cm}} + \delta \max_{z_{cm}} \cdot 0,3;$$

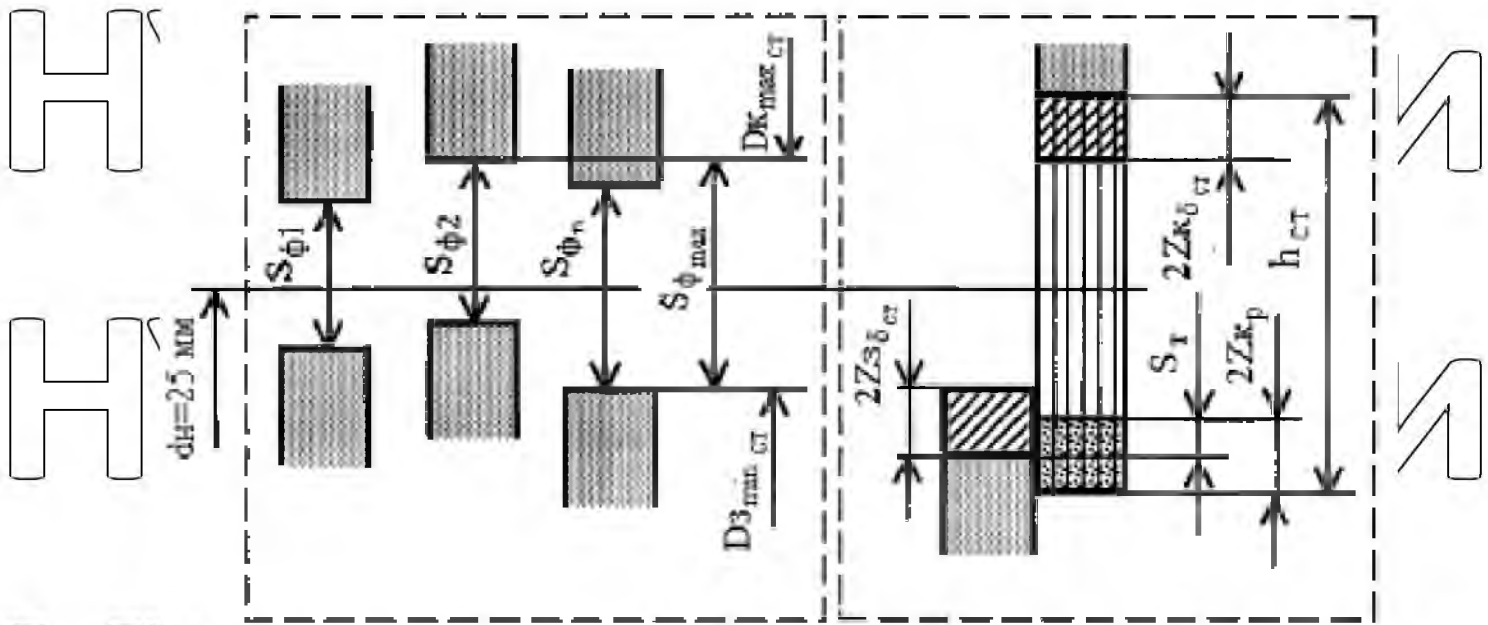
де  $\delta \max_{k_{cm}}$ ,  $\delta \max_{z_{cm}}$  - відповідно максимальне відхилення геометричної форми отвору корпусу та золотника статистично досліджуваної партії з'єднань, мкм.

Тоді для забезпечення технологічного зазору в з'єднаннях при  $\Delta S_{cm} = 124 \text{ мкм}$ ,  $\delta \max_{k_{cm}} = 38 \text{ мкм}$ ,  $\delta \max_{z_{cm}} = 21 \text{ мкм}$  необхідно зменшити діаметр отвору корпусу на 221 мкм.

При необезличеному ремонті у формулу (2.1) підставляються значення зносів золотника і корпусу  $g$  - з'єднання,  $j$  - гідророзподільника, припуски на виведення слідів зносу та виправлення геометричної форми золотника і корпусу також визначається за максимальним значенням  $g$  - з'єднання,  $j$  - гідророзподільника, т.е.

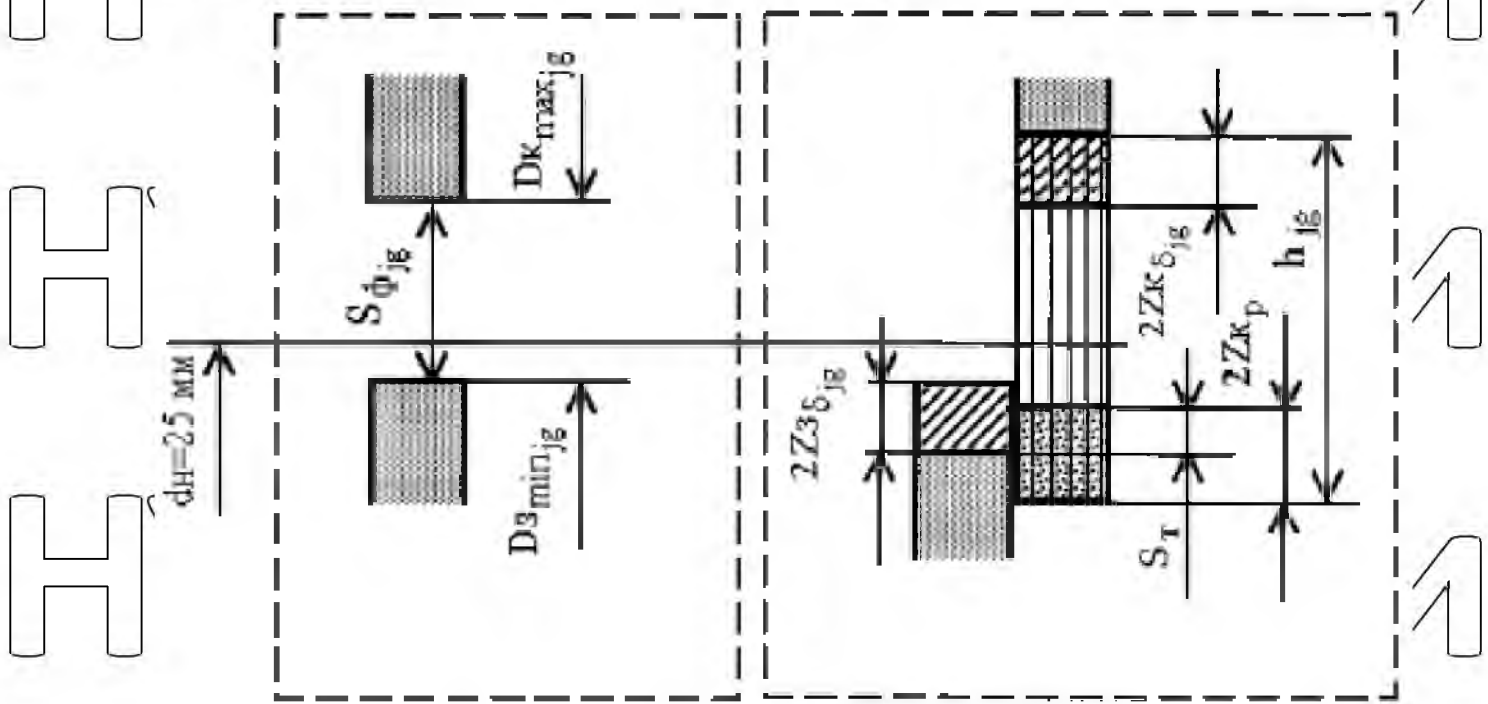
$$h_{jg} = \frac{\Delta S_{jg} + 2Zk_{\delta_{jg}} + 2Zz_{\delta_{jg}} + 2Zk_p}{2}, \quad (2.3.)$$

де  $\Delta S_{jg}$  - зазор без урахування нормативних вимог  $j$  - гідророзподільника,  $g$  - з'єднання, мкм



а)

б)



в)

г)

а) статистично досліджуваної партії; б) відновлених під час знесобленого ремонту; в) j - гідророзподільника, г - з'єднання, мм  
 г) - відновлених при незнесобленому ремонті

Рисунок 2.2. З'єднання деталей золотникової пари

$\Delta S_{jg} = D_{k_{max_{jg}}} - D_{z_{min_{jg}}} - S_T$ ,

де  $D_{k_{max_{jg}}}$ ,  $D_{z_{min_{jg}}}$  - відповідно максимальне значення діаметра отвору корпусу та мінімальне значення діаметра золотника  $j$  - гідророзподільника,  $g$  - з'єднання, мкм;

$2Z_{k_{\delta_{jg}}}$ ,  $2Z_{z_{\delta_{jg}}}$  - відповідно припуски на виведення слідів зносу отвору корпусу та золотника  $j$  - гідророзподільника,  $g$  - з'єднання, мкм;

$$2Z_{k_{\delta_{jg}}} = \delta \max_{k_{jg}} + \delta \max_{k_{jg}} \cdot 0,3;$$

$$2Z_{z_{\delta_{jg}}} = \delta \max_{z_{jg}} + \delta \max_{z_{jg}} \cdot 0,3;$$

де  $\delta \max_{k_{jg}}$ ,  $\delta \max_{z_{jg}}$  - відповідно максимальне відхилення геометричної форми отвору корпусу та золотника  $j$  - гідророзподільника,  $g$  - з'єднання, мкм.

Обробку деталей з'єднання «золотник – корпус» пропонується здійснювати доведенням притиром. Цей метод чистової обробки при невеликій програмі випуску дозволяє забезпечити точність за відсутності дорогого обладнання та спеціального оснащення.

Так, наприклад, для забезпечення вихідного технологічного зазору в першому з'єднанні гідророзподільника №5 (з'єднання з максимальним фактичним зазором статистично досліджуваної партії), при фактичному зазорі  $S_{5,1} = 91 \text{ мкм}$ , максимальному відхиленні геометричної форми поясів, відповідно отвори корпусу та золотника  $\delta \max_{K_{5,1}} = 19 \text{ мкм}$  і

$\delta \max_{z_{5,1}} = 16 \text{ мкм}$  необхідно нанести шар металопокриття завтовшки не менше 145 мкм на діаметр отвору корпусу. Для першого з'єднання гідророзподільника №11 (з'єднання з мінімальним фактичним зазором статистично досліджуваної партії) з фактичним зазором  $S_{11,1} = 21 \text{ мкм}$ ,

максимальним відхиленням геометричної форми поясів, відповідно отвори корпусу і золотника  $\delta \max_{K_{11,1}} = 4 \text{ мкм}$  і  $\delta \max_{K_{11,1}} = 4 \text{ мкм}$  необхідно

нанести шар металопокриття завтовшки не менше 40 мкм на діаметр отвору корпусу.

3 вищерозглянутих підходів до відновлення зношених з'єднань «золотник-корпус» найбільша перевага при незначному ремфонді та малій програмі ремонту має небезособливий ремонт. Аналіз наплавних технологій

показав, що для усунення малих зносів найбільш прийнятним способом є ЕП з подальшим доведенням чавунним притиром.

## 2.2. Умови взаємодії робочих поверхонь вузла тертя «золотник - корпус» гідророзподільника та шляхи підвищення його триботехнічних властивостей

З'єднання «золотник - корпус» є поширеною парою тертя, до якої пред'являються такі вимоги: тривале збереження гідроцильності, і, як наслідок, забезпечення низької швидкості зношування; висока задиростійкість, корозійна стійкість та низький коефіцієнт тертя.

Як було зазначено у пункті 1.1., основними причинами, що викликають порушення працездатності гідророзподільників є: високий коефіцієнт тертя спокою та руху пари «золотник - корпус», а також зношування поясів отвору та золотника.

Як відомо [68] низьке тертя і малий знос сполук забезпечуються, якщо створюються умови, за яких міцність молекулярних зв'язків, що виникають, на поверхні тертя менше, ніж міцність нижчележачих шарів. Це досягається введенням на поверхню тертя рідких або консистентних мастил, нанесенням на поверхню тертя металевих плівок з олова, міді, бронзи, алюмінію, свинцю та їх сплавів.

Для пар тертя у зонах фактичного торкання питома зсувна міцність молекулярних зв'язків описується біноміальною залежністю [80], МПа

$$\tau = \tau_0 + \beta \cdot p_r, \quad (2.4.)$$

де  $\tau_0$  - питома міцність зсуву молекулярних зв'язків при екстраполяції нормального фактичного тиску до нуля, МПа;

$\beta$  - коефіцієнт, що враховує змінення фрикційного зв'язку під впливом нормального тиску;

$p_r$  - фактичний тиск на контакті, МПа.

Що стосується умов роботи пари тертя «золотник - корпус» знаходимо

[80], що  $\tau_0 = 37,7 \text{ МПа}$ ,  $\beta = 0,15$ , отже, міцність молекулярних зв'язків у зонах фактичного дотику становитиме  $\tau = 68,45 \text{ МПа}$ , МПа.

За технічними умовами виготовлення та відновлення з'єднань «Золотник - корпус» [10], золотники ( $\varnothing 25^{+0,068}_{-0,012}$  з стали 15Х твердістю по НRC 56...63,

шорсткістю за Ra = 0,63 мкм) при складанні сортуються на 20 розмірних груп через 0,004 мм так само як і корпусу ( $25^{+0,080}$  мм, матеріал - сірий чавун СЧ21 твердістю 170-205 НВ і шорсткістю по Ra = 0,8 мкм).

Завершальною операцією виготовлення отвору корпусу є алмазне хонінгування, тому чистота обробки знаходиться на рівні сьомого - восьмого класів, а поверхня має хвилястість. Для золотника фінішною операцією є безцентрове шліфування, при цьому чистота обробки відповідає восьмому класу, а поверхня також має хвилястість.

Результати дослідження параметрів шорсткості та хвилястості, подані у пункті 4.5. (табл.4.7.;4.8.) показали, що з поверхні золотника і отвори характерні співвідношення  $R_{\max} > 0,1H_B$ .

Для таких сполук контурний тиск на поверхню визначається із співвідношення [81], МПа:

$$p_c = \frac{1}{K_W K_B} \left( \frac{H_{B_T}}{2R_{B_T}} \right)^{\frac{\nu_B}{2(\nu_B + \delta)}} \cdot p_a^{\frac{\delta}{\nu_B + \delta}} \quad (2.5)$$

де  $\nu_B$ ,  $K_W$  - коефіцієнти, за умови, що обидві поверхні хвилясті

$$K_W = 2,4, \nu_B = 3;$$

$H_{B_T}$  - висота хвилі твердого матеріалу, мкм;

$R_{B_1}$  – радіус вершини хвилі твердого матеріалу, мкм;  
 $\Theta_{\Sigma}$  – сумарна пружна постійна матеріалу двох поверхонь, що деформуються, МПа<sup>-1</sup>:

$$\Theta_{\Sigma} = \Theta_1 + \Theta_2,$$

де  $\Theta_1, \Theta_2$  – відповідно пружні постійні матеріалу золотника та корпусу, МПа<sup>-1</sup>:

$$\Theta_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1}, \quad \Theta_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}$$

де  $\mu_1$  і  $\mu_2$  – відповідно коефіцієнти Пуассона матеріалів золотника та корпусу;  
 $E_1$  та  $E_2$  – відповідно модулі пружності матеріалів золотника та корпусу, МПа.

$\Theta_{\Sigma} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} = \frac{1 - 0,3^2}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{1 - 0,27^2}{0,8 \cdot 10^5} = 1,59 \cdot 10^{-5}$

Значення Кв і  $\delta$  визначаються через безрозмірні коефіцієнти

$$\frac{1}{\Theta_{\Sigma} HB} = 548 \quad \text{та} \quad \frac{R_{\max_3}}{H_{BK}} = 0,67 \quad \text{за таблицями, наведеними в роботі [81],}$$

де HB – твердість м'якого матеріалу з'єднання;  
 $R_{\max_3}$  – найбільша висота нерівностей профілю твердого матеріалу з'єднання – золотника, мкм;

$H_{BM}$  - висота хвилі м'якого матеріалу - корпусу, мкм. Тоді  $K_B = 2,1$  і  $\delta = 1,6$ .

$p_a$  - максимальний питомий тиск на контактну поверхню, МПа  
 По умовах експлуатації гідророзподільника Р-80 максимально питомий тиск масла на контактну поверхню складає 8,0 МПа

НУБІП УКРАЇНИ

$$p_c = \frac{1}{2,4} \cdot \frac{7 \cdot 10^{-3}}{2,1} \cdot \frac{3}{2(3+1,6)} \cdot \frac{8,0}{3+1,6} = 81,7 \text{ MPa}$$

Вид деформации в зонах контакта определяется сопоставлением значения контурного давления в контакте с ее расчетным значением определяемого по формуле:

$$\frac{p_c}{HB} = \frac{0,5 \cdot 5,4^2}{\Delta_{np}^v} \left[ \frac{HB(1 - \mu_2^2)}{E_2} \right]^{2,2} \quad (2.6.)$$

де  $\Delta_{np}$  - приведенный комплексный параметр шероховатости исследуемых поверхностей золотника и корпуса:

$$\Delta_{np} = \frac{\Delta_1 \cdot \Delta_2}{\Delta_1 + \Delta_2} = \frac{7,3 \cdot 10^{-2} \cdot 7 \cdot 10^{-2}}{7,3 \cdot 10^{-2} + 7 \cdot 10^{-2}} = 3,6 \cdot 10^{-2}$$

де  $\Delta_1$  - комплексный параметр шероховатости досліджуваної поверхні золотника;

$\Delta_2$  - комплексный параметр шероховатости досліджуваної поверхні корпусу;  
 $\nu$  - параметр опорної кривої золотника.

$$\frac{p_c}{HB} = \frac{0,5 \cdot 5,4^2}{0,036^2} \left[ \frac{205(1 - 0,27^2)}{0,8 \cdot 10^5} \right]^{2,2} = 3,58 \cdot 10^7$$

звідси  $p_c = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ МПа МПа}$

Контурний тиск у вузлі тертя набагато більше за розрахунковий ( $81,7 \gg 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}$ ), отже, у зонах контакту спостерігатимуться пружнопластичні деформації.

Розрахункове значення контурного тиску, при якому зовнішнє тертя переходить во внутрішнє:

$$p_c = \frac{HB}{2^{2+\nu}} \left( 1 - \frac{6\tau}{HB} \right)^\nu = \frac{205}{2^{2+0,036^2}} \left( 1 - \frac{6 \cdot 68,4}{205} \right)^2 = 19849 \text{ МПа} \quad (2.7.)$$

Оскільки знайдене значення контурного тиску, у якому зовнішнє тертя перетворюється на внутрішнє, більше ніж задане у вузлі ( $19849 \gg 81,7$  МПа), деталі з'єднання працюватимуть у режимі зовнішнього тертя.

Розрахунковий коефіцієнт зовнішнього тертя розраховується за формулою

$$f = f_M + k(\nu) \cdot \Delta_{np}^{1/2} \left( \frac{2p_c}{HB} \right)^{1/2}, \quad (2.8.)$$

де  $k(\nu)$  - функція, яка залежить від  $\nu$ ;

$f_M$  - молекулярна складова коефіцієнта тертя:

$$f_M = \frac{\tau_0}{HB} + \beta;$$

Розрахунок коефіцієнта тертя за формулою (2.8) здійснюється тільки з урахуванням гідропритискання золотника до поверхні отвору. У міру зношування пари тертя відбувається перекоє золотника в отворі, тоді контурна площа контакту поступово зменшується, а тиск зростає.

Нині неможливо теоретично визначити коефіцієнт тертя вузла «золотник - корпус» при перекоє золотника. Тому дослідження проводяться експериментальним шляхом..

Навантаження заїдання пари тертя теоретично може бути визначено за формулою [82], МПа

$$P_{mt} = \frac{H\mu_2 \cdot r_r}{2R_{Zr}^2} \left( \frac{1-2\epsilon_r}{\sigma_{Tm}} \right) \quad (2.9.)$$

де  $H\mu_2$  - мікротвердість м'якшого приробленого матеріалу, МПа

$R_{Zr}$  - середня висота профіля мікронерівностей твердого матеріалу, мкм

$\sigma_{Tm}$  - границя текучості більш м'якшого матеріала, МПа

В основу експериментальної оцінки навантаження заїдання і коефіцієнта тертя відновлених з'єднань покладені дослідження на межі заїдання.

Згідно рекомендаціями [81] з'єднання з інтенсивністю зношування  $10^{-7}$  відносяться до класу пар тертя, на поверхні яких проходить контактна взаємодія з пружнопластичним деформуванням. На підвищення довговічності пари тертя «золотник - корпус» необхідно, щоб інтенсивність зношування була менше  $10^{-7}$ , тобто контактна взаємодія пар тертя було пружним

Інтенсивність зношування припрацьованої золотникової пари тертя, при пружному контакті, знаходиться за формулою [80]:

$$I = 0,2^{\frac{t_y}{2\nu+1}} \cdot 0,2 \cdot 0,5^{t_y-1-\frac{2}{2\nu}} \cdot K_{tv} \cdot p_a^{1+\frac{t_y}{2(2\nu+1)}} \times$$

$$\times E_{np}^{\frac{2t_y(5\nu+2)}{5(2\nu+1)}-1} \cdot \Delta_{np} \frac{\nu t_y}{2\nu+1} \cdot \left( \frac{H_{B7}}{R_{B7}} \right)^{\frac{5(2\nu+1)}{2t_y}} \cdot \left( \frac{kf}{\sigma_0} \right) \quad (2.10)$$

де  $t_y$  - показатель кривой фрикционной усталости при упругом контакте;

$E_{np}$  - наведений модуль пружності матеріалів золотника та корпусу, МПа;

$k$  - коефіцієнт, що характеризує напружений стан контакту, залежить від природи матеріалу;

$\sigma_0$  - параметр фрикційної втоми, МПа;

$K_{tv}$  - поправочний коефіцієнт, визначається по номограмі [80];

$f$  - коефіцієнт зовнішнього тертя при пружному контакті:

$$f = 1,5 \left[ \frac{\tau_0 \cdot \alpha_{ef} \cdot (1 - \mu_2^2)}{E_{np}} \right]^{\frac{1}{2}} + \beta, \quad (2.11)$$

$\alpha_{ef}$  - коефіцієнт гістерезисних втрат.

Підставивши у формулу (2.10.) чисельні значення параметрів сполуки

$K_{tv} = 2,5$ ;  $k = 3$ ;  $t_y = 3,51$ ;  $\nu = 2$  і  $\sigma_0 = 1200$  МПа [81] отримаємо:

$$I = 0,04 \cdot p_a^{1,14} \cdot E_{np}^{2,37} \cdot \Delta_{np}^{1,4} \cdot \left( \frac{H_{Fr}}{R_{Fr}} \right)^{0,28} \cdot \left( \frac{3f}{\sigma_0} \right)^{3,51} \quad (2.12)$$

При відновленні отворів корпусу гідророзподільника, як впливає з формули (2.11.), коефіцієнт зовнішнього тертя золотникової пари можна знизити, зменшивши фрикційні характеристики пари  $\tau_0$  і  $\beta$  та підвищивши модуль пружності поверхні отвору.

З формули (2.12.) Впливає, що інтенсивність зношування золотникової пари практично лінійно залежить від номінального тиску. Зі збільшенням наведеного модуля пружності і показника його ступеня інтенсивність зношування збільшується, але однозначної залежності між ними експериментально встановити важко, так як є зв'язок між  $E_{np}$  і  $f$ ,  $\sigma_0$ ,  $t_y$ . Збільшення властивостей міцності матеріалу поверхні отвору  $\sigma_0$  і  $t_y$

підвищує зносостійкість з'єднання. Чим більше  $\sigma_0$ , тим міцніше поверхня матеріалу при одноразовому розриві, і чим більше  $t_y$ , тим більше циклів потрібно відділення частки зносу.

Інтенсивність зношування значною мірою залежить від коефіцієнта тертя та комплексної шорсткості  $I \propto f^{t_y} \cdot \Delta^g$ . Вплив хвилястості на інтенсивність зношування припрацьованих пар тертя незначно, тому що відношення  $H_v/R_v$  поверхонь оброблених вище 7-го класу змінюється не більше ніж на два порядки.

Крім цього, рельєф і параметри шорсткості повинні бути такими, щоб забезпечувалася гідрощільність з'єднання. Цього можна досягти створенням на відновленій поверхні отвору рельєфу із замкнутими порожнинами.

За розташуванням матеріалів вузол тертя «золотник - корпус» є прямою парюю, тобто.

$$H_{\mu 1} > H_{\mu 2}, \text{ а } F_1 < F_2,$$

де  $H_{\mu 1}, H_{\mu 2}$  - відповідно, мікротвердості поверхонь золотника та отвори;  
 $F_1, F_2$  - відповідно, площі поверхонь тертя золотника та отвори.

Як відомо [83], прямі пари мають меншу задиристійкість, ніж зворотні пари. Тому, при відновленні зношених отворів корпусу та золотника необхідно домогтися такого поєднання матеріалів, щоб твердість поверхонь отворів була вищою, ніж твердість поверхонь золотника.

Як було встановлено [84], економічно та технічно найбільш придатним методом відновлення отворів у чавунних корпусах гідророзподільників, що відповідає вищевикладеним вимогам, є ЕІН.

### **2.3. Основні теоретичні залежності процесу електроіскрового наплавлення різних матеріалів на робочі поверхні чавунних деталей**

В даний час є незначний експериментальний матеріал з електроіскрового наплавлення різних матеріалів на поверхню деталей, виготовлених з чавуну, особливо на внутрішні поверхні [26, 53, 57, 58, 68, 84-90].

Фізична сутність електроіскрового наплавлення матеріалів на такі поверхні полягає в тому, що в процесі обробки графітові включення у структурі чавуну відіграють роль додаткових мікроелектродів і суттєво впливають на товщину покриття, на його мікротвердість, пористість та суцільність. Тому виявлення деяких закономірностей ЕІН різних матеріалів на поверхню чавунних деталей має важливе теоретичне та практичне значення.

Як було зазначено, метод ЕІН заснований на явищі електричної ерозії та полярного перенесення електрода (анода) на поверхню деталі (катод) при протіканні імпульсних розрядів у газовому середовищі. Тривалість імпульсу розряду при ЕІН становить  $10^{-6} \geq \tau_i < 10^{-3}$ . ЕІН проходить тим успішніше, чим більша кількість матеріалу електрода (анода) зруйнується і закріпиться на поверхні деталі (катода) в одиницю часу.

Електричні схеми (рис.2.3.) сучасних генераторів струму для ЕІН сконструйовані таким чином, що процес розряду накопичувальних конденсаторів починається після короткого замикання вершин шорсткості деталі та електрода, тепловий стан яких може бути описаний термодинамічного рівняння [89,91]:

$$c\gamma \frac{dT}{dt} = \frac{3}{4} \chi^2 n_r \rho_0 [1 + \alpha_T (T_K - T_0)] \frac{3k}{L_{k.z.}} (T_K - T_0) \quad (2.13.)$$

де  $c$  - питома теплоємність, Дж/г·К;  $\gamma$  - щільність речовини, г/мм<sup>3</sup>;  $\rho_0$

- питомий електричний опір, Ом·мм;  $\chi$  - щільність струму, А/мм<sup>2</sup>;  $n_r$  -

кількість плям контакту, шт.;  $k$  - коефіцієнт теплообміну, Вт/мм<sup>2</sup>·К;  $\alpha_T$  -

температурний коефіцієнт лінійного розширення, К<sup>-1</sup>;  $T_0$  і  $T_K$  - початкова і

кінцева температури контактних поверхонь, К;  $L_{k.z.}$  - сумарна довжина лінії

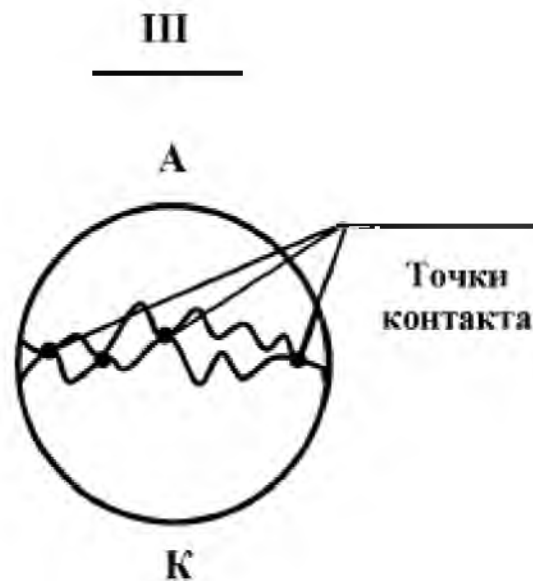
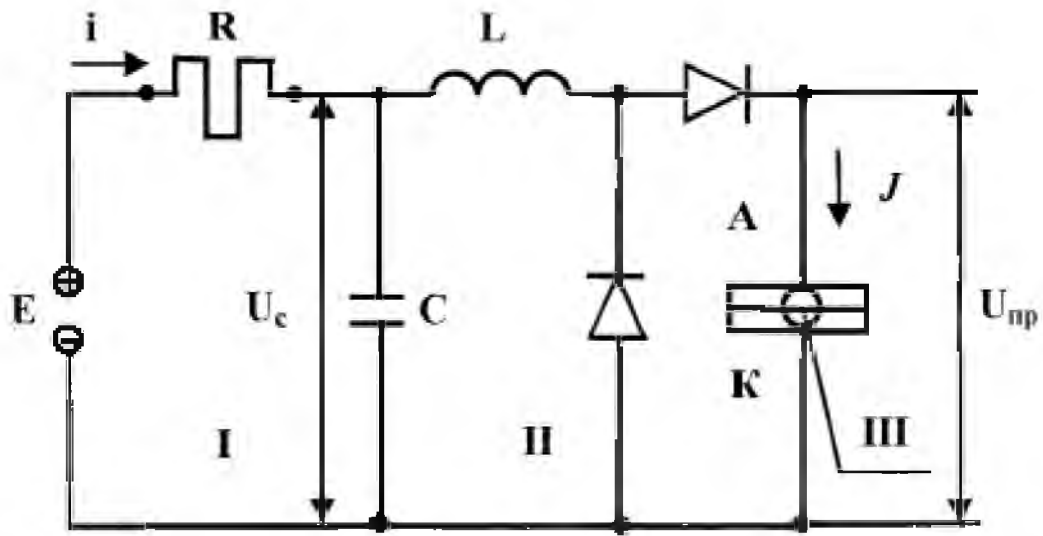
контакту короткого замикання, мм;  $t$  - час короткого замикання, с.

Для відновлення зношених отворів у корпусах гідророзподільників застосовано два типи обробних пристроїв. зі зворотно-поступальним рухом електрода (рис.2.4.) та зі зворотно-поступальним та обертальним рухом (рис.2.5.).

При використанні для ЕІН ручного вібратора зі зворотно-поступальним рухом компактного стрижневого електрода (рис.2.4.) одиничний акт короткого замикання може бути представлений як замикання шорсткості за їх вершинами та бічними поверхнями.

У момент часу  $t_0$  частина виступів або одиничні виступи поверхонь вступають у механічний контакт, тим самим комутуючи розрядний ланцюг генератора імпульсу струмів.

# НУВБІП УКРАЇНИ



$i$  - струм у ланцюзі живлення I;

$U_c$  - напруга на конденсаторі;

$R$  - баластовий опір;

$J$  - струм у розрядному ланцюзі II;

$U_{пр}$  - напруга у розрядному проміжку III;

$L$  - індуктивність у розрядному ланцюзі II.

Рисунок 2.3 Узагальнена електрична схема електроіскрової установки

# НУВБІП УКРАЇНИ

За відсутності хвиль, коли контурна площа  $F_c$  і контурний тиск контакту  $p_c$  дорівнюють номінальним, число плям фактичного контакту  $n$  визначається за формулою [81], шт.:

$$n_r = \frac{3,1 \cdot F_c}{21 \cdot r \cdot R_a} \left( \frac{p_c}{p_r} \right)^{0,66}, \quad (2.14)$$

де  $p_r$  - фактичний тиск контакту, МПа;  $r$  - наведений радіус вершин

нерівностей у поздовжньому та поперечному напрямках, мм;  $R_a$  - середнє арифметичне відхилення висоти профілю, мм.

Середня площа плям контактів [81], мм<sup>2</sup>:

$$\Delta F_r = 11,97 \cdot r \cdot R_a \cdot \left( \frac{p_c}{p_r} \right)^{0,33} \quad (2.15.)$$

Середня відстань між нерівностями [81], мм:

$$S_r = 0,57 \cdot (21 \cdot r \cdot R_a)^{0,5} \cdot \left( \frac{p_c}{p_r} \right). \quad (2.16.)$$

Отже, до проходу імпульсу струму може відбуватися механічна деформація вершин шорсткості електродів від статичного та динамічного навантажень, що створює умову додаткового підігріву деформованих мікрооб'ємів металу та їх активацію.

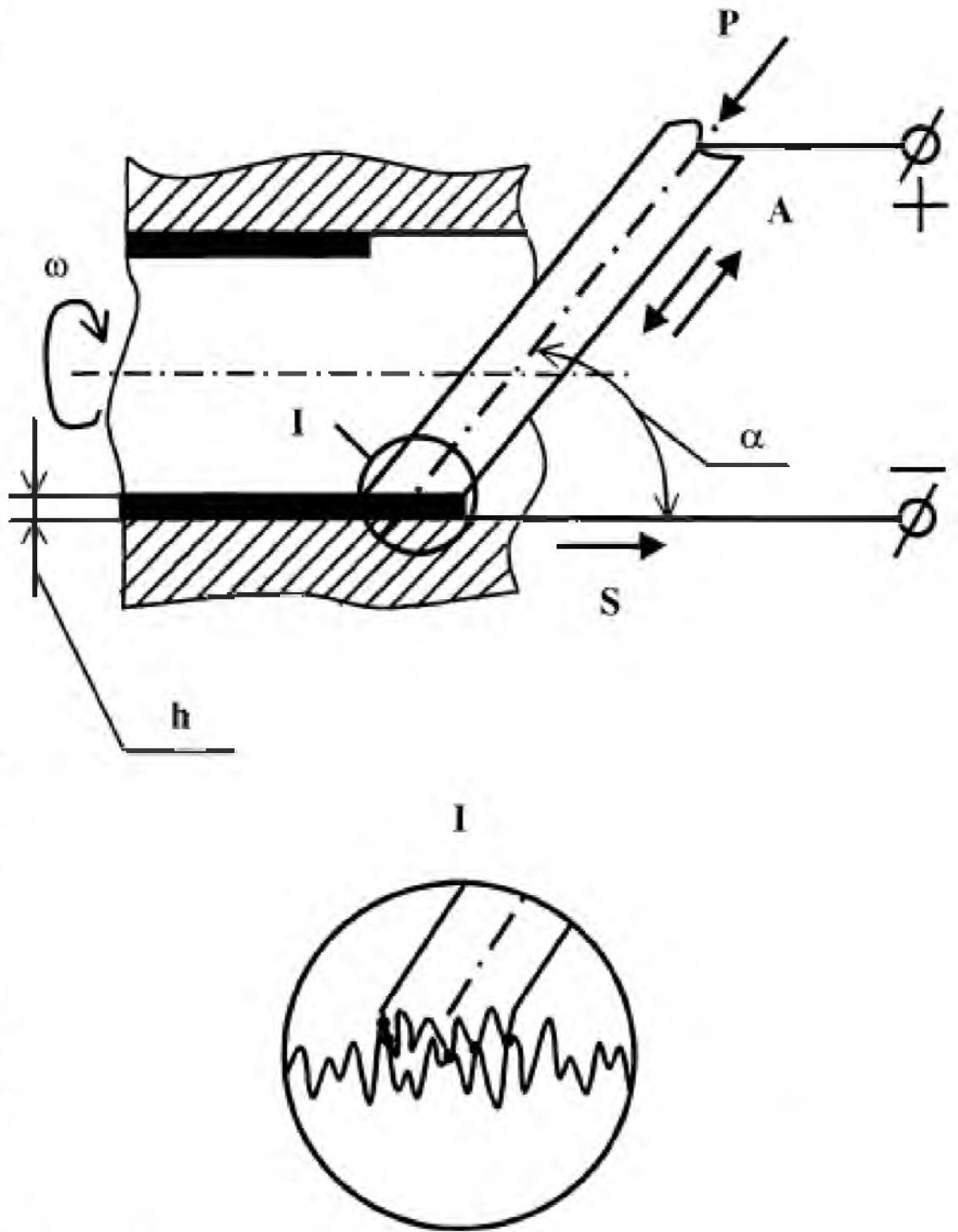


Рисунок 2.4 - Схеми формування смуги напруженого шару матеріалу при обробці ручним вібратором із зворотньо-поступальним рухом стержневого електрода

НУБІП України

НУБІП України



Від моменту часу  $t_0$  дотику вершинами шорсткості електрода вершин шорсткості деталі (рис.2.3.), через час  $t_0 + \Delta t$ , де  $\Delta t$  - час затримки початку розряду, починається процес імпульсного розряду батареї накопичувальних конденсаторів і виділення енергії на електроди і в контактну зону. Процес короткого замикання супроводжується плавленням містків зв'язку електричними розрядами у прилеглих зонах.

При  $R \approx 0$  (радіус-вектор точки вимірювання температури, мм), під дією імпульсу струму, що проходить по містках зв'язку, матеріали контактних зон нагріваються до оплавлення і сублімації за час  $t$ , величина якої може бути визначена за формулою [92-94], с :

$$t = \frac{\pi \cdot \lambda^2 \cdot T_{пл}^2}{4 \cdot a \cdot (q_i - q)^2}, \quad (2.17.)$$

де  $q$  - щільність потоку енергії, Вт/мм<sup>2</sup>;  $\lambda$  - теплопровідність Вт/мм-К;

$T_{пл}$  - температура плавлення НЕ, К;  $a$  - коефіцієнт температуропровідності, мм<sup>2</sup>/с:

$$a = \frac{\lambda}{c \lambda}$$

У мікроповерхнях, що нагріваються, деталі і електрода виникають термічні напруги, що призводить до збільшення їх обсягу, і зокрема, подовження лежучого електрода. Розмір відносного подовження електрода визначається за такою формулою [93-97]

$$\varepsilon = \alpha_T T_{пл} \left( \frac{2\mu}{1-\mu} + 1 \right), \quad (2.18.)$$

а термічна напруга, що виникає при цьому, МПа:

$$\sigma = \frac{E \cdot \alpha_T \cdot T_{пл}}{1 - \mu}, \quad (2.19.)$$

З формул (2.18.) і (2.19.) випливає, що деформація електрода та його напружений стан прямо пропорційно модулю пружності, коефіцієнту

лінійного подовження, температурі нагрівання і обернено пропорційно коефіцієнту Пуассона.

Температура початку руйнування електрода визначається за формулою [95], К:

$$T_p = \frac{\sigma \cdot (1 - \mu)}{E \cdot \alpha_T} \quad (2.20)$$

Температурний стан електродів у зоні контакту може бути визначений за формулою [93-96], К:

$$T_k(R, t) = \frac{q \cdot \tau_i}{c \sqrt{4\pi a t}} \cdot e^{-\frac{R^2}{4at}}, \quad (2.21.)$$

де  $t$  — час спостереження, с.

З формули (2.21.) Випливає, що значення кінцевої температури в контактній зоні зростає зі збільшенням енергії розряду, коефіцієнта теплопровідності та зменшенням питомої теплоємності, щільності речовин.

Подовження електрода створює додатковий тиск та деформацію на площах фактичного контакту. Електричні опори елементарних контактів виявляються значними, і внаслідок нагрівання відбувається їхнє руйнування в результаті плавлення та випаровування.

У процесі деформації та оплавлення найбільш високих мікронерівностей електродів відбувається зближення двох поверхонь під дією навантаження  $P$  (див. рис.2.4.) та розтягування струму, щільність якого зменшується, оскільки збільшується фактична площа контактів. Якщо щільність струму вище критичного значення, то починають розплавлятися містки зв'язку і менших нерівностях. Під впливом газодинамічних сил електрод відкидається від поверхні деталі. У цьому не порушується провідність струму, оскільки міжелектродний проміжок заповнюється плазмою.

Провідність міжелектродного проміжку в загальному випадку складається з провідностей зон фактичного контакту, повітряного проміжка та

плазми, утвореної виникненням іскри. Це наслідком дискретного характеру контактування поверхонь деталі та електрода.

При використанні для ЕІН ручного вібратора з поворотно-поступальним і обертовим електродом (рис.2.5.) відхід електрода від поверхні деталі відбувається з двох причин. По-перше, нерівності поверхні електрода при його обертанні виходять з механічного контакту. По-друге, електрод, не виходячи з механічного контакту в процесі руху по малій кривизні, відкидається від поверхні деталі під впливом газодинамічних сил, що виникають від вибухового оплавлення містків зв'язку в результаті дії тепла Джоуля-Ленца, якщо щільність струму в контактній області вище деякого критичного значення.

Як у першому, так і в другому варіантах обробки поверхні деталі ерозія електрода та перенесення речовини на поверхню деталі при короткому замиканні відбувається за рахунок асиметрії тепла в гарячій точці містків зв'язку, що утворюються при замиканні електродів і електричних розрядів в прилеглих зонах. Відрив містка відбувається в основі електрода, так як швидкість охолодження розплавленого металу на поверхні деталі набагато вище. Наявність такого ефекту експериментально доведено в роботі [42], де показано, що перенесення матеріалу спрямований у бік електрода, що знаходиться далі від нагрітої точки, зазвичай катода (деталі).

При відході електрода від поверхні деталі від дією енергії вибуху за короткий проміжок часу починає діяти поверхневе джерело тепла, що нагріває мікроб'єми металу до  $(5... 10) \times 10^3$  °С і збуджує ударні хвилі, які створюють тиск на поверхнях у межах  $(2.. 7) \times 10^6$  Н/мм<sup>2</sup>.

Під дією цих факторів руйнуються мікроб'єми поверхневих шарів електродів, що супроводжується перенесенням матеріалів на електрод і на деталь та дифузією їх у приповерхневі області.

## 2.4. Товщина покриття та вибір режимів електроіскрового наплавлення

Ерозія легуючого електрода та поверхні деталі, ступінь перенесення зруйнованого матеріалу на оброблювану поверхню, дефектність покриття значно впливають на продуктивність процесу ЕІН та товщину покриття.

Характеристики перенесення зруйнованого металу і товщина покриття залежать від багатьох факторів, що важко враховуються. Дослідження процесів руйнування електродів при проходженні іскрового розряду малої тривалості в газовому середовищі та перенесення зруйнованого матеріалу електричною іскрою на поверхню деталі пов'язані з великими труднощами. Тому узагальнення теоретичного та експериментального матеріалу є великою науковою цінністю.

У першому наближенні лінійну залежність приросту маси металу на поверхні деталі при ЕІН за одиницю часу можна подати у вигляді:

$$\gamma W = (\varpi \tau_i + m_0) \cdot \nu_i / t_{об}, \quad (2.22.)$$

де  $\gamma$  і  $W$  - щільність, г/мм<sup>3</sup> і обсяг, мм<sup>3</sup> металу перенесеного на поверхню деталі за час  $t_{об}$ ;  $\varpi$  - масова швидкість руйнування електрода за одиничний іскровий розряд, г/хв;  $\tau_i$  - тривалість одиничного імпульсу струму, хв;  $m_0$  - маса зруйнованого електрода за одиничний іскровий розряд, викинута в довкілля, г;  $\nu_i$  - частота імпульсів струму, що виробляються генератором, Гц;  $t_{об}$  - час обробки до насичення поверхні деталі матеріалом, що наплавляється і досягненні необхідної суцільності, хв.

За даними в [90], для різних пар «деталь-електрод» обсяг матеріалу, що переноситься на оброблювану поверхню в одиницю часу приблизно можна визначити за формулою, мм<sup>3</sup>/хв:

$$\frac{dV}{dt} = Y = AW^0 = \nu_i \zeta K_C C_{II} \quad (2.23.)$$

де  $A, \theta, \xi$  - коефіцієнти, що залежать від властивостей сполучених електродів, зокрема, коефіцієнтів температуропровідності (2.17.) та термічного подовження (2.18.), термічної напруги (2.19.) та діаметра електрода;  $W = JU_{\tau_i}$  - Енергія одиничного іскрового розряду, Дж;  $J$  - сила

струму одиничного іскрового розряду, А;  $U$  - напруга одиничного іскрового розряду, В;  $K_c$  - коефіцієнт, що враховує вплив на масоперенесення розрядних ємностей, включених паралельно міжелектродному проміжку (рис.2.3.):

$$K_c = 1 + \eta C, \quad (2.24.)$$

де  $C$  - ємність розрядних батарей, Мкф

Коефіцієнт перенесення матеріалу еродованого електрода на поверхню деталі

$$C_{II} = \left( \frac{\gamma W}{\omega \tau_i} \right) \cdot v_i \cdot t_{ob} = B - K_H W, \quad (2.25.)$$

де  $B$  - коефіцієнт, що враховує насичення переносного матеріалу і поверхні, що наплавляється матеріалами із зовнішнього середовища. Для сплавів на основі заліза та міді  $B \approx 1$ .

Отже, товщину покриття утворену  $B$  на одиничній поверхні  $S$  можна визначити з формули:

$$h = \frac{AW^\theta v_i^\xi K_c C_{II} t_{ob}}{S} = \frac{(\omega \tau_i - m_0) \cdot v_i \cdot t_{ob}}{S \gamma} \quad (2.26.)$$

Численні експерименти, проведені різними дослідниками і, в тому числі, автором даної роботи [42], показали, що коефіцієнт перенесення  $C_{II}$  зруйнованого (еродованого) матеріалу наплавлюваного електрода (ВК-60М, Т а, Т15К6, Т5К10, А1, Т ь Н20Х80, АСМ-20-1 та ін. матеріали) на поверхню деталей зі сплавів на залізній, нікелевій та титановій основах змінюється в широких межах (0,25... 1,2). Значення  $C_{II} > 1$  викликані тим, що зруйнований матеріал і поверхня, що наплавляється насичені елементами із зовнішнього середовища.

При експериментальних дослідженнях коефіцієнт перенесення зруйнованого матеріалу електрода  $C_{II}$  визначається як відношення приросту ваги деталі  $\Delta m_{Д}$  до ваги віднесеного з поверхні електрода  $\Delta m_{e}$ .

При електроіскровій наплавці нерідкі випадки, коли товщина покриття може зростати, а маса деталі, що наплавляється, зменшується. В окремому випадку це пов'язано з тим, що при ЕІН, якщо неправильно підібраний електрод, значному руйнуванню піддається і поверхня деталі, що наплавляється.

Перша умова вибору електрода, що наплавляється, полягає в тому, щоб за величиною ерозії анода  $D_a$  а повинна значно перевершувати ерозію катода  $D_k$ , тобто:

$$K_{II} = \frac{\Delta m_k}{\Delta m_a} \quad (2.27.)$$

Переважне перенесення матеріалу анода на катод здійснюється за умови [85]:

$$D_M = \frac{c_k \rho_k \lambda_k (T_{пл}^k - T_{хл}^k)^2}{c_a \rho_a \lambda_a (T_{пл}^a - T_{хл}^a)^2} \cdot \frac{r_k}{(r_a - r_k)} \cdot \frac{1}{a_a^* \cdot a_k^*} \quad (2.28.)$$

де  $c, \rho, \lambda, T_{пл}, T_{хл}$  - соответственно удельные теплоемкость, электропроводность, теплопроводность и температуры плавления, хладноломкости для матеріалів анода та катода;  $r_a, r_k$  - атомний радіус

матеріалу анода та катода;  $\frac{1}{a_a^* \cdot a_k^*}$  - коефіцієнт обліку ковалентності

міжатомного зв'язку матеріалів анода і катода (для металів  $\sim 1$ ).

Таким чином, виходячи з механічних та теплофізичних властивостей електродів, електричних характеристик генераторів та механічних

властивостей вібраторів, можна здійснювати вибір матеріалу електрода та

технологічних режимів процесу ЕІН для нанесення покриттів необхідної товщини та якості, із заданими механічними властивостями.

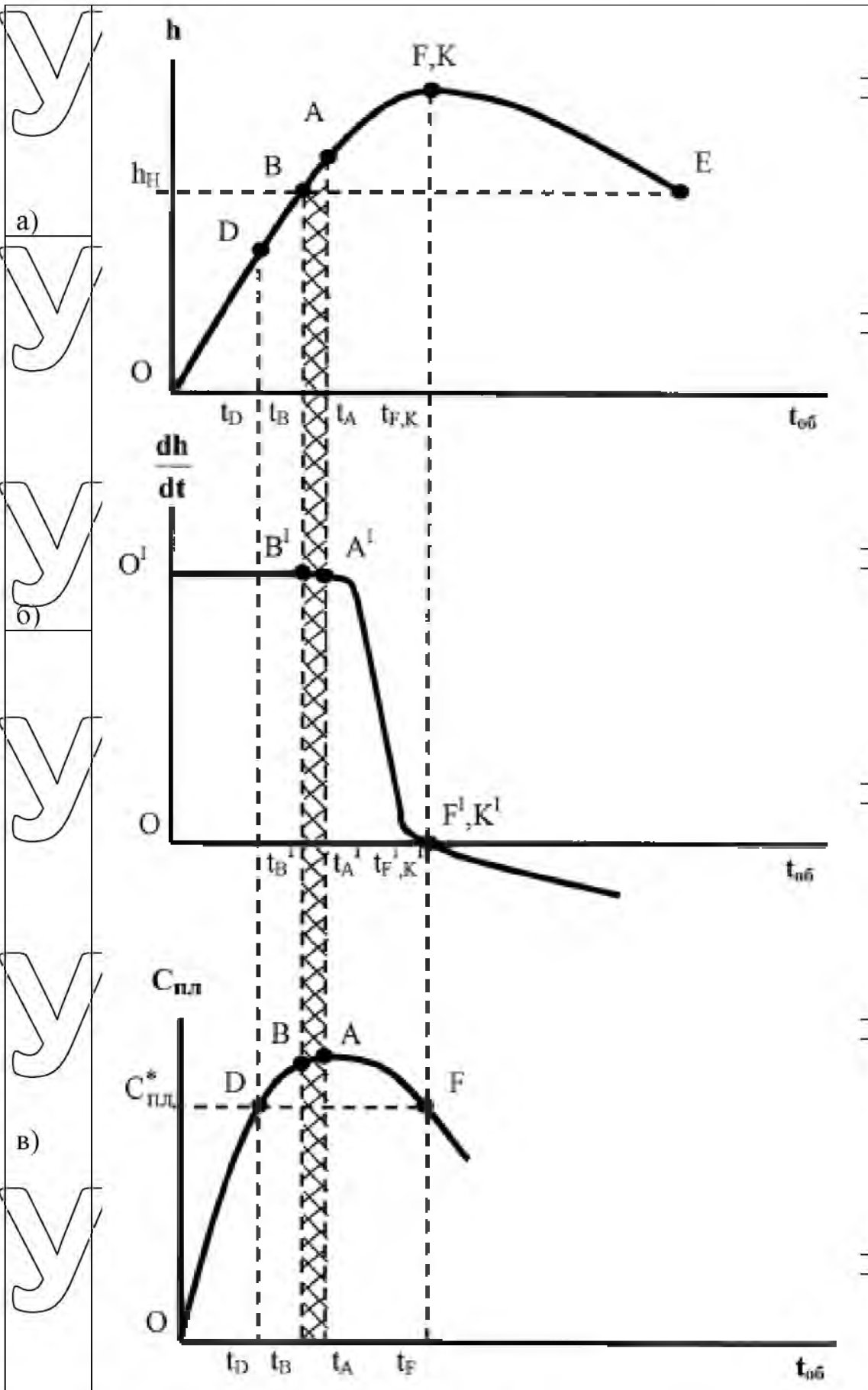


Рисунок 2.6. Критерій вибору режимів БПН за параметром  $t_{об}$

Пошук раціональних режимів ЕІН деталей, проведений автором разом із Іоновим П.А. під керівництвом Бурумкулова Ф.Х., Лезіна П.П. та Лельчука Л.М. [16], дозволив розробити критерій, що зв'язує товщину покриття, швидкість наплавлення (продуктивність) і суцільність шару (рис.2.6.).

При виборі ефективних режимів ЕІН за параметром  $t_{об}$  для кожного матеріалу анода та енергетичного режиму, необхідно виконати умови при максимальній продуктивності процесу:

- 1) - Товщина нанесеного шару  $h > h_H$ ,
- 2) - суцільність шару  $C_{пл} \geq C_{пл}^*$ ,

де  $h_H$  і  $C_{пл}^*$  необхідні нормативні товщина і суцільність шару, які встановлюються виходячи з даних статистики зношування робочих поверхонь деталей, припуску на обробку та вимог до триботехнічних показників вузла тертя.

Таким чином, основними критеріями вибору режимів ЕІН є задана нормативна товщина  $h_H$  і суцільність  $C_{пл}^*$  при максиній продуктивності процесу. При цьому збільшення похідної  $\frac{dh}{dt}$  має бути позитивною.

## РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1. Програма досліджень

Для успішного вирішення поставлених завдань, шляхом планомірного проведення робіт з урахуванням досвіду попередніх дослідників, необхідний комплексний підхід, що включає теоретичні та експериментальні дослідження, виробничу та експлуатаційну перевірки, техніко-економічний аналіз результатів досліджень.

Загальна програма досліджень, представлена на рисунку 3.1 передбачає низку заходів що дозволяють зрештою отримати ефективну технологію для сучасного ремонтного виробництва.

### 3.2. Методика дослідження експлуатаційних зносів та дефектів деталей з'єднання «золотник-корпус» гідророзподільників

Дослідження експериментальних зносів виконано на статистично представницькій партії зношених сполучень «золотник – корпус».

Необхідну кількість ( $n$ ) об'єктів дослідження, що дає необхідну точність вимірювань, при заданій довірчій ймовірності  $\alpha = 0,95$  та відносній помилці  $\varepsilon = 0,15$ , визначали з виразу [98]:

$$\varepsilon = t_{\alpha} \frac{\nu}{\sqrt{n}}, \quad (3.1.)$$

де  $t_{\alpha}$  - коефіцієнт Стюдента,

$\nu$  - коефіцієнт варіації (очікуване значення коефіцієнта варіації дорівнює 0,3).

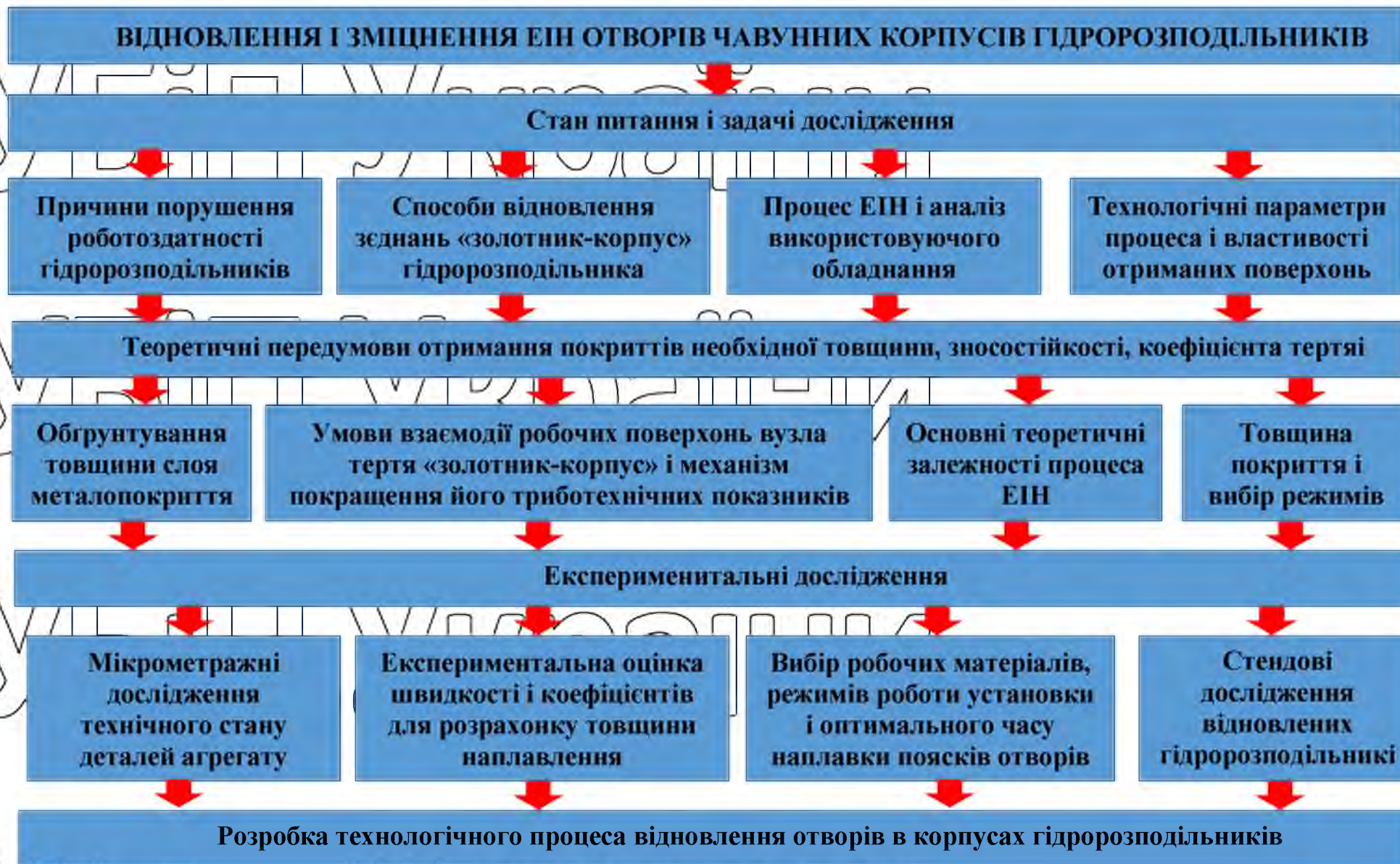


Рисунок 3.1 - Загальна програма досліджень

При  $\alpha = 0,95$  і  $\frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n}} = \frac{\varepsilon}{\nu} = \frac{0,15}{0,3} = 0,5$  по [98], находим  $n = 57$ . Таким чином, для досліджень необхідно взяти щонайменше 57 золотникових пар.

Нами було взято партію гідророзподільників у кількості 20 штук, що відповідає 60 золотниковим сполукам і дозволяє отримати більш достовірні дані.

Дослідженням піддавалися зовнішній діаметр поясків золотника  $\varnothing 25^{+0,068}_{-0,012}$  і внутрішній діаметр поясків колодязя корпусу  $\varnothing 25^{+0,80}$ .

В якості засобів вимірювання використовувалися наступні інструменти:

для золотника - мікрометр важеля МРІІ 25-50 ГОСТ 11098-75 з точністю 0,001 мм, для отворів корпусу - індикаторний нутромір 18-25 ГОСТ 868-82 з точністю індикаторної головки 0. Прилади пройшли атестацію та мають відповідні сертифікати.

Після розбирання золотники та корпус маркувалися (I, II, ... - рис.3.2. і рис.3.3.), що дозволило не знеособлювати з'єднання і більш достовірно визначити фактичний знос та зазор у парі. У золотника маркувався торець з боку штуцерів агрегатів гідросистеми, причому фіксувався номер гідророзподільника та номер відповідного золотнику отвори корпусу. Корпус маркувався на верхній базовій поверхні з боку штуцерів. Фіксувався номер гідророзподільника та номер колодязя корпусу.

Потім золотники та корпус гідророзподільника промивалися в розчині миючого засобу та просушувалися.

Вимірювалися шість поясків золотника (нумерувалися пояски щодо торця з боку штуцерів) та відповідні їм пояски колодязів корпусу. Кожен поясок вимірювався у двох взаємно перпендикулярних площинах, визначення еліпсності і двох перерізах (А-А, Б-Б) визначення конусності. На кожен поясок припадало по чотири виміри.

НУБІП України

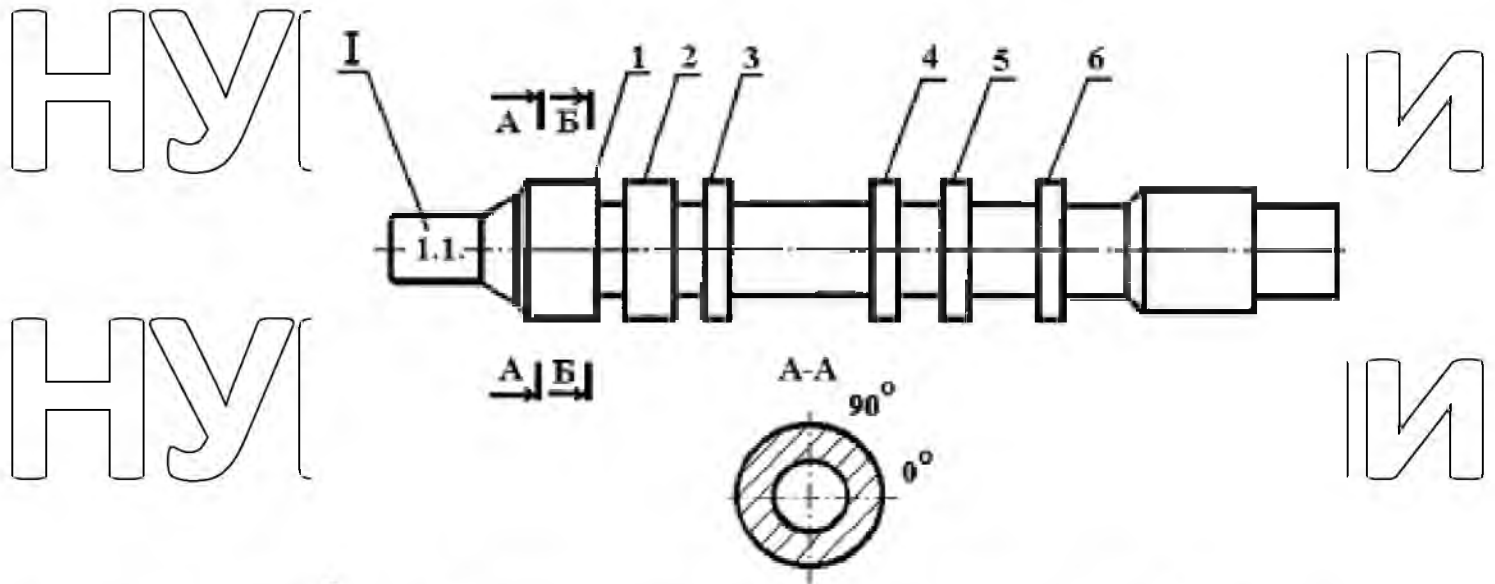


Рисунок 3.3 - Золотник гідророзподільника Р-75

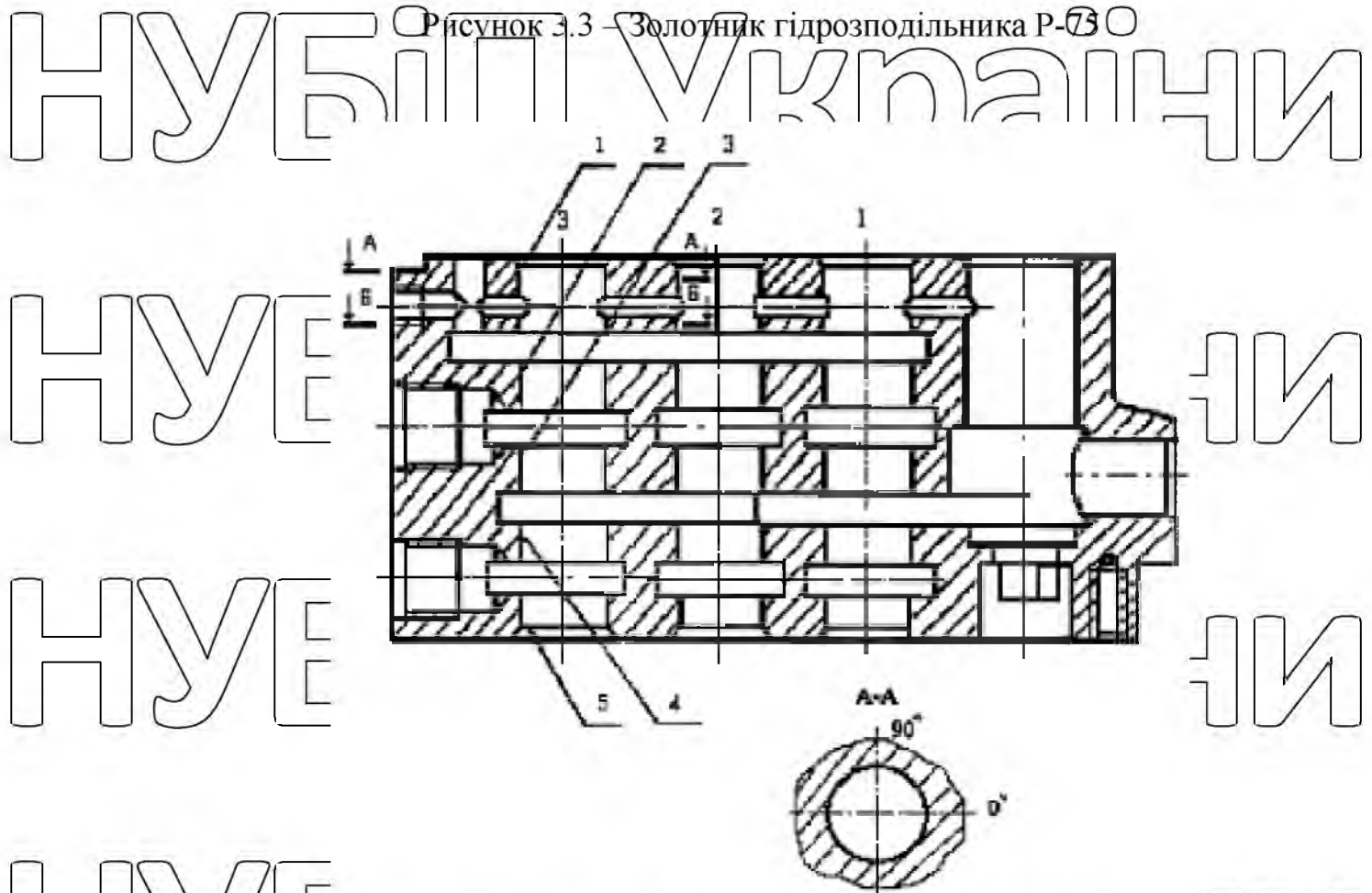


Рисунок 3.2 - Корпус гідророзподільника Р-75

Крім умовних зносів поясків золотників та корпусів гідророзподільників

за допомогою спеціального нескладного освітлювального пристосування



досліджувалися дефекти золотникових отворів (всього 84 отвори) у корпусах гідророзподільників  $n_D$

Коефіцієнт повторюваності дефекту визначали за такою формулою:

$$K = \frac{n_D}{n} \quad (3.2)$$

де  $n_D$  - кількість отворів, що мають даний дефект;

$n$  - загальна кількість отворів.

Після завершення вимірів проводилася первинна обробка даних, дослідженням піддавалися варіаційні ряди.

### 3.3. Методика вибору режимів роботи установки та часу наплавлення поясків отворів при відновленні корпусів гідророзподільників

Ця методика полягає у виборі часу наплавлення чавунних зразків марки СЧ21 ГОСТ 1412-79 різними матеріалами на різних режимах.

Електроіскрову наплавку здійснювали на модернізованій установці "Елітрон-22БМ" (рис.3.4.), що живиться від побутової електромережі.

Енергетичні характеристики установки представлені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Основні енергетичні характеристики установки "Елітрон-22БМ".

Найменування параметру	Режими установки				
	1	2	3	4	5
Середнє значення зарядного струму, А	0,3	0,4	0,6	2,6	3,8
Амплітуда напруги на накопичувальному конденсаторі, В	45	67	67	96	96
Місткість накопичувальних конденсаторів, МкФ $\pm 30\%$	60 $\pm 20$	60 $\pm 20$	60 $\pm 20$	360 $\pm 120$	360 $\pm 120$
Енергія розряду, Дж	0,06	0,13	0,28	0,81	1,66



Рисунок 3.4 - Загальний вигляд експериментальної модернізованої установки «Елітрон-22БМ»

Матеріали підбиралися на основі аналізу літературних даних. Для досліджень прийняли 3,4 та 5 режими, т.к. лише вони дозволяють ефективно проводити товщину покриття зразка. Перший та другий використовуються для зміцнення. Зразки обробляли до отримання максимальної товщини шару та фіксували початок його руйнування. Досліджувана площа становила  $1 \text{ см}^2$ . Обробка велася з урахуванням необхідності проведення теплопоічних перерв для запобігання перегріву електрода та встановлення. В якості катода використовували чавунні плоскопаралельні (з допуском непаралельне  $0,005 \text{ мм}$ ) зразки СЧ21 розміром  $20 \times 20 \times 10 \text{ мм}$  і шорсткістю поверхонь Ra1,6. При вказаних умовах експеримент проводили вібратором зі зворотно-поступальним обертсьвим ( $10000 \text{ об/хв}$ ) і рухом, що не обертається, стрижневого електрода.

Перед нанесенням шару зразки тричі зважувалися на терезах ВЛР 200 г та вимірювалися мікрокалором. Ціна розподілу індикаторної голівки  $5 \text{ мкм}$ .

Після нанесення шару зразки тричі зважувалися і вимірювалися. Крім того, вони піддавалися зовнішньому огляду, при цьому визначали якість сформованого шару та наявність у ньому дефектів із використанням лупи п'ятикратного збільшення. Кожен експеримент повторювали тричі.

На підставі отриманих результатів побудовано графіки зміни товщини та маси від часу обробки.

### 3.4 Методика стендових та експлуатаційних випробувань відновлених гідророзподільників

Оцінку якості відновлення та регулювання гідророзподільників здійснювали за допомогою стенду для приймальних випробувань моделі КІ-4815 (рис.3.13.).

Стенд забезпечує можливість визначити:

- функціонування;
- герметичність золотникової пари;
- зовнішню герметичність;
- внутрішню герметичність;
- регулювання та контроль тиску налаштування запобіжного клапана;
- величину спрацьовування автомата повернення золотника;
- перепад тиску;
- час підйому та опускання.



Рисунок 3.13 - Стенд для приймальних випробувань моделі КІ-4815

Перед експлуатаційними випробуваннями відновлені гідророзподільники перевірялися на гідросільність та налаштовувалися на стенді КІ-4815. Випробування проводили за технічними вимогами на капітальний ремонт ТК 70.0001.018-81. Необхідне навантаження для перевірки функціонування розподільника створювали вручну за допомогою дроселя. Перевірений золотник встановлювали в нейтральну позицію. Робочу рідину подавали в канал, що веде до циліндра під тиском 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 МПа. Вимірювання витоків здійснювали за 1 хв, при температурі робочої рідини 45-55 °С нагнітального каналу гідророзподільника. У відремонтованих золотникових пар гідророзподільників Р-75 при тиску 7 МПа вони повинні становити не більше 3-4 см<sup>3</sup>/хв. Як робочу рідину використовували мінеральну олію, що має при температурі 50 °С в'язкість 60-70 сСт. Вимірювання витоків за одну хвилину повторювали не менше трьох разів. Відновлені

гідророзподільники, які відповідають технічним умовам на капітальний ремонт, передані в експлуатацію.

Спостереження в умовах експлуатації є процесом, що забезпечує отримання достовірної інформації про надійність об'єктів, що спостерігаються. Мета планування спостережень полягає у визначенні необхідного обсягу спостережень для отримання оцінок показників надійності із заданою точністю та достовірністю.

ГОСТ 23.224-86 «Методи оцінки зносостійкості відновлених деталей» рекомендує: для випробувань методами груп Б,В,Г обсяг партії деталей щонайменше 10 штук. Проведений розрахунок відповідно до ГОСТ 27.502-83 показав, що  $N=10$  при наступних вихідних даних:

- гранична відносна помилка  $\delta = 0,15$ ;
- довірна ймовірність  $\alpha = 0,9$ ;
- пропонований коефіцієнт варіації ресурсу складальної одиниці 0,35.

Відновлені гідророзподільники встановлювали на трактори МТЗ-80 та Т-40 у господарствах. Кількість досконалих циклів роботи реєструвалося механічними лічильниками СЕ-65, а напрацювання виробу - за лічильниками мотогодин на двигуні.

На підконтрольну партію заводився журнал спостережень, у якому з періодичністю щомісяця заносилися відомості про технічний стан гідророзподільника та його напрацювання. При настанні відмови фіксувалося напрацювання розподільника, встановлювалася причина відмови, та спостереження за цим об'єктом припинялося. Спостереження за підконтрольною партією проводилися протягом року з початку експлуатації, після чого фіксувалося напрацювання до цензурування для кожного гідророзподільника.

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Результати дослідження дефектів та зношування деталей з'єднання «золотник-корпус» гідророзподільників

Відповідно до поставленого завдання дослідження дефектів і зношування золотникових пар гідророзподільників, з метою замінити розточування отворів на наплавлення, було проведено мікрометраж деталей, згідно з методикою представленою в п.3.2.

В результаті досліджень було встановлено:

1. Знос поясків отворів корпусу та золотників відбувається нерівномірно. У отворів корпусів максимально зношується поясок 3 (мал.3.3), мінімально поясок 1. Середнє зношування 3 пояска більше 1 в 2,7 рази, а максимальне зношування - більше 2,3 рази і становить 50 мкм при середньому значенні 17,2 мкм. У поясків золотників гідророзподільників максимально зношується поясок 6 (рис.3.2.), мінімально поясок 2. Середнє зношування 6 пояска більше 2 в 2,9 рази, а максимальне зношування більше 2,8 рази і становить 45 мкм при середньому значенні 14,2 мкм.

Відповідно до висновків М'ясоїдова Н.С. [17] фактичний знос пояска отвору корпусу перевищує допустимий у 2,1 рази, а золотника у 2 рази. Поясок отвору корпусу зношується в 1,2 разів інтенсивніше, ніж золотника, з чого випливає, що досліджувана партія гідророзподільників експлуатувалася при забрудненій рідині, що містить догор, що не згорають, менше 0,04%.

На рис. 4.1.-4.2. представлені щільності розподілу максимальних зносів поясків отворів корпусів і золотників, що підпорядковуються закону Вейбулла в двопараметричній формі:

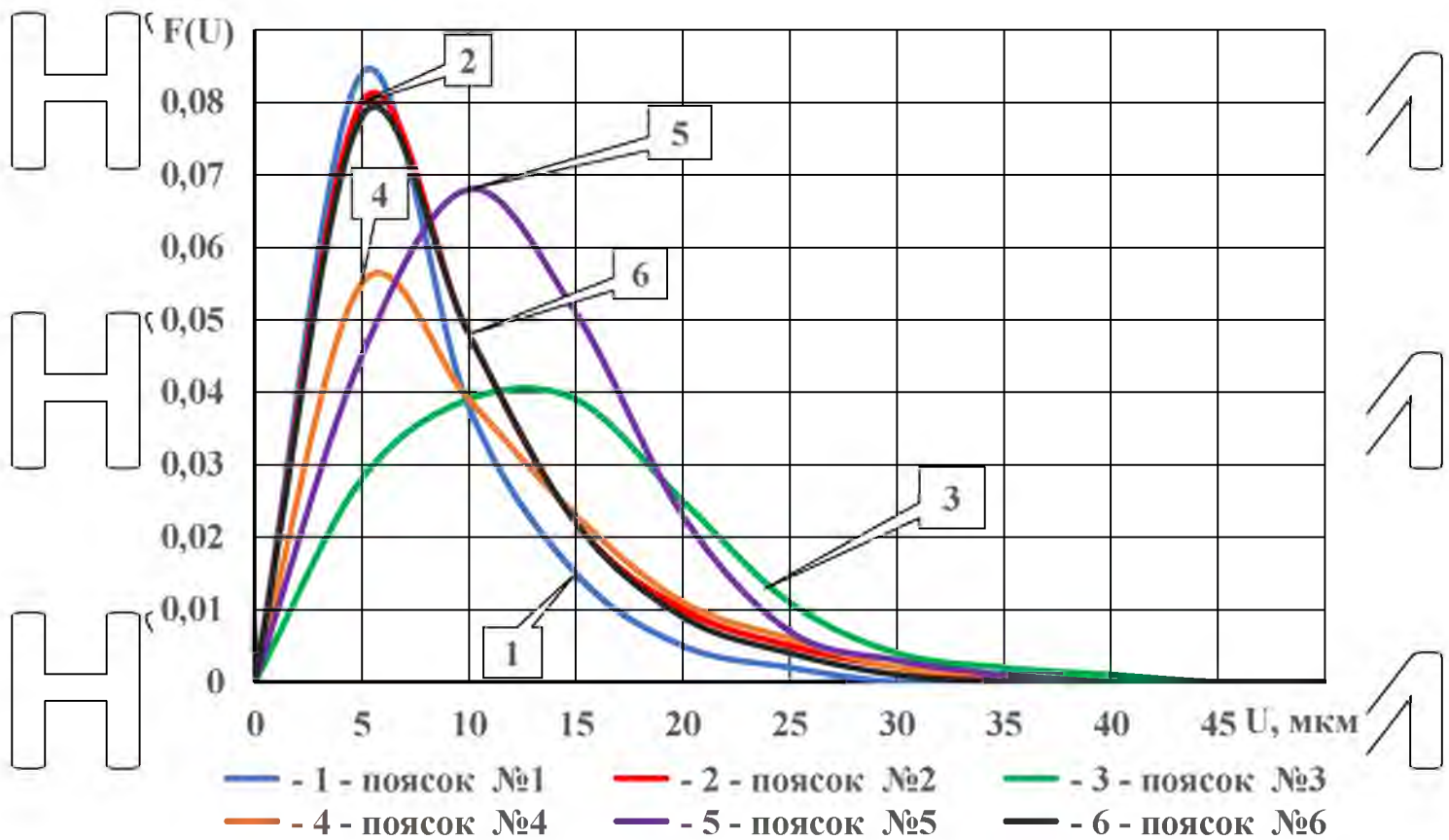


Рисунок 4.1 - Розподіл максимальних зношування поясків отворів корпусів гідророзподільників

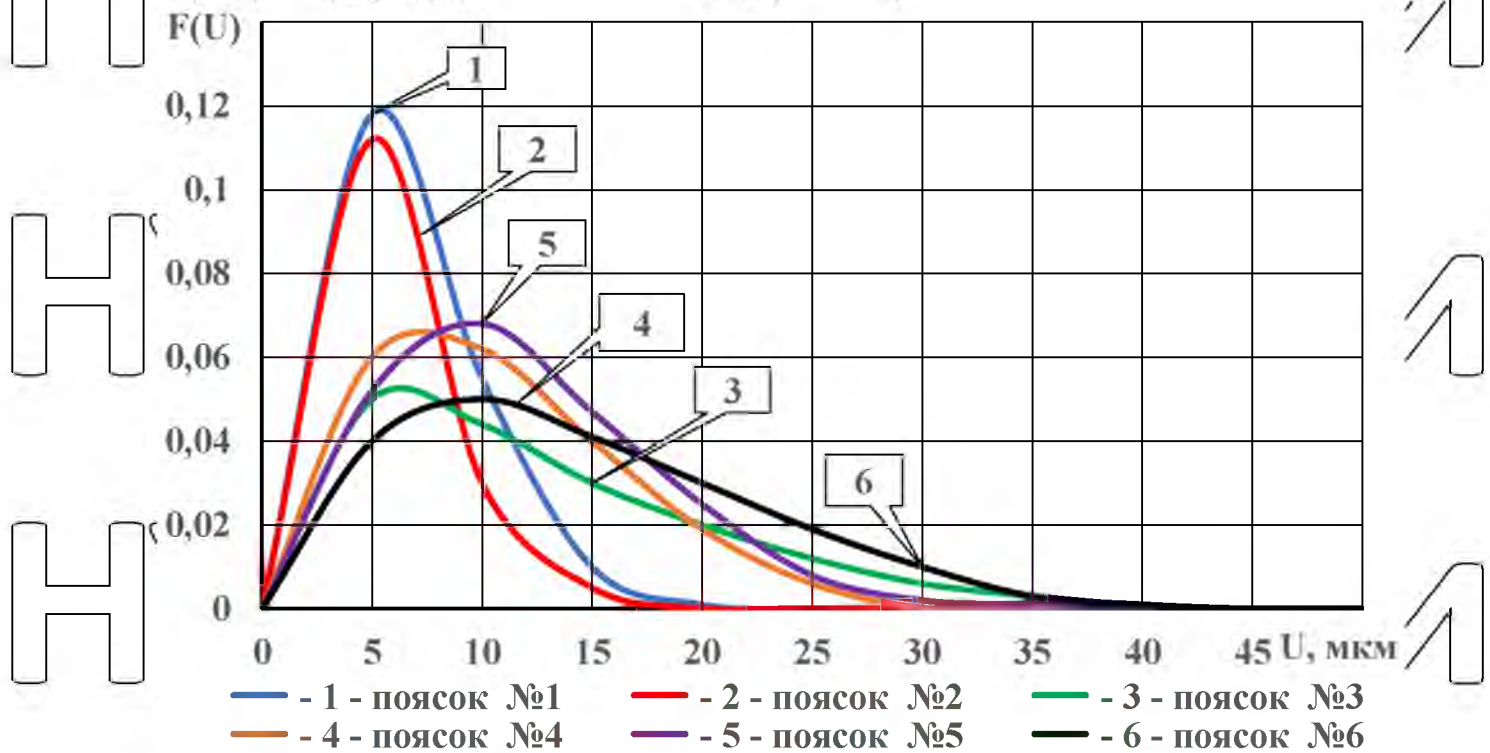


Рисунок 4.2 - Розподіл максимальних зношування поясків золотників гідророзподільників

На рис.4.3 представлена щільність розподілу зазору в з'єднаннях «золотник-корпус», що підпорядковується закону Вейбулла в трипараметричній формі:

$$F(S) = 0,055 \left( \frac{S-12}{40,78} \right)^{1,25} \cdot e^{-\left( \frac{S-12}{40,78} \right)^{2,25}} ; \text{ при } S \geq S_T$$

з параметрами  $a = 40,78$ ;  $b = 2,25$ ;  $S_T = 12 \text{ мкм}$ .

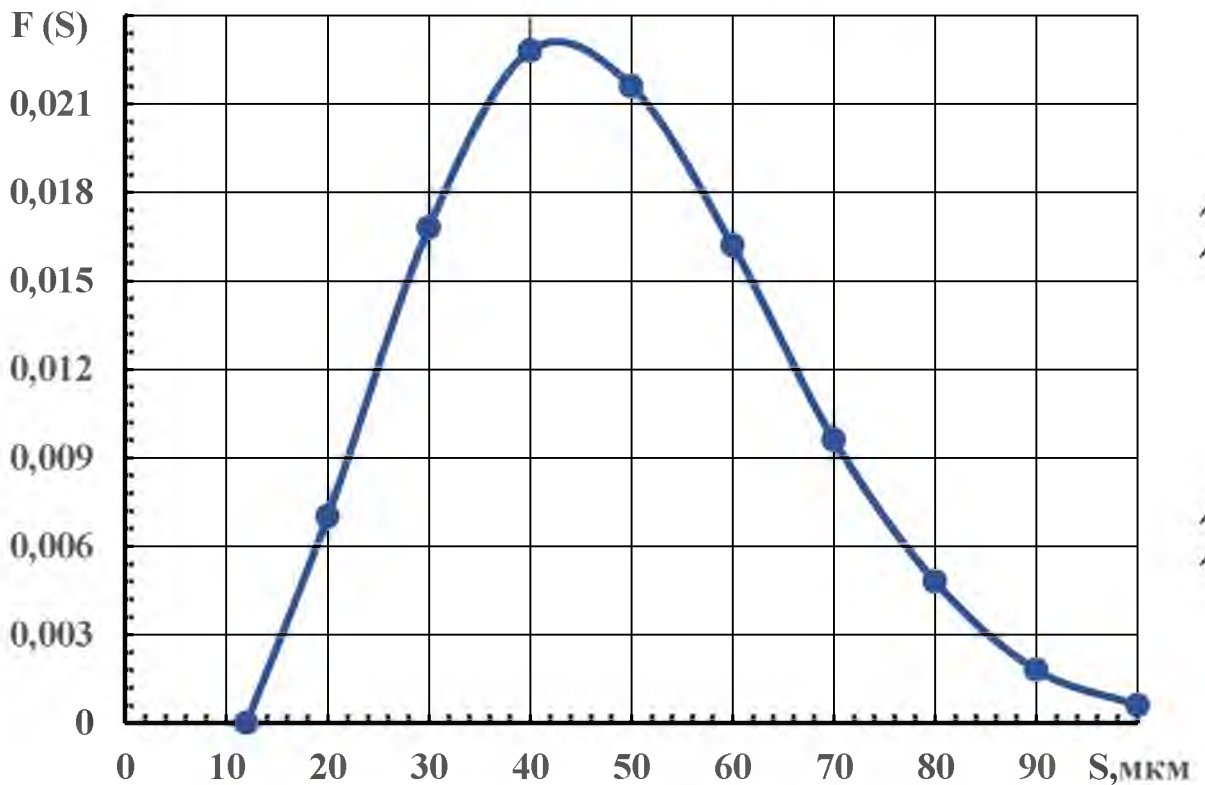


Рисунок 4.3 - Розподіл зазору у посадці «золотник-корпус»

При дослідженні партії корпусів крім зношування та відхилення геометричної форми золотникових отворів були виявлені такі дефекти: точкові каверни, подряпини та ризики вздовж отвору, подряпини та ризики по діаметру поясків отвору, фарбування або вимивання зерен графіту, скель кромek. Крім того, як наслідок окисного зношування, на поверхнях поясків мають місце темні плями неправильної форми. Коефіцієнт повторюваності та способи усунення вищезгаданих дефектів представлені в табл.4.1.

Таблиця 4.1

Дефекти поясків золотникових отворів корпусів гідророзподільників

Дефекти	Повторюваність дефекту		Спосіб усунення	
	коефіцієнт	у %	старий	новий
1. Знос та відхилення геометричної форми.	1	100	Переточування під ремонтний розмір	Метод ЕІН
2. Крапкові каверни.	0,31	31	Переточування під ремонтний розмір	Метод ЕІН
3. Подряпини та ризики вздовж отвору.	0,23	23	Переточування під ремонтний розмір	Метод ЕІН
4. Дряпини та ризики по діаметру поясків отвору.	0,67	67	Переточування під ремонтний розмір	Метод ЕІН
5. Сліди схоплювання..	0,39	39	Переточування під ремонтний розмір	Метод ЕІН
6. Скіл кромek.	0,048	4,8	Не відновлюється	Не відновлюється

До цього часу при відновленні з'єднання вищезазначені дефекти не усувалися взагалі або усувалися при розточуванні на один з п'яти ремонтних розмірів (крім 6). Застосування методу ЕІН відновлення золотникового отвору дозволяє повністю усунути вищезазначені дефекти (крім 6).

Аналіз результатів мікрометражних досліджень показує, що основною причиною втрати працездатності пари «золотник-корпус» є знос та відхилення геометричної форми поясів золотника та корпусу. У зв'язку з цим відновлення корпусів як типових деталей з малими експлуатаційними лінійними зносами, що не перевищують 45 мкм по діаметру, раціонально проводити електроіскровою наплавкою.

## 4.2. Результати досліджень покриттів, отриманих методом електроіскрового наплавлення

Результати досліджень мікротвердості покриттів, отриманих ЕІН, представлені у табл. 4.2. Тут же, для порівняння, наведено довідкові дані щодо мікротвердості матеріалів електродів у вихідному стані. Видно, що всі покриття мають високу мікротвердість, а також, що мікротвердість покриттів на всій протяжності вздовж зони з'єднання практично не змінюється, що свідчить про досить високу стабільність їх структури. Мікротвердість покриття вглиб зони з'єднання знижується. Значення мікротвердості першого шару (3-10 мкм), який повинен зішліфуватися, виміряти не вдалося, оскільки при вимірі він руйнується.

Найбільшу мікротвердість  $H_{\mu} = 6820 \dots 7590$  Н/мм має покриття, отримане при ЕІН чавуну СЧ21 сталлю У10. Покриття зі сталі 3, 65Г, зварювального дроту СВ08Г2С і міді М1 мають, практично, однакову мікротвердість  $H_{\mu} = 4000 \dots 7600$  Н/мм, що заслуговує на особливу увагу при виборі матеріалів для нанесення зносостійких покриттів (за допомогою ЕІН). При цьому слід враховувати думку автора [108], який зазначає, що шари, що складаються в основному з легованого аустеніту або безструктурного мартенситу, знижують свою твердість при  $T=300-400$  °С на відміну від шарів, структура яких містить карбиди. Мікротвердість покриття з міді М1 становить  $H_{\mu} = 4200 \dots 5250$  Н/мм, що приблизно відповідає мікротвердості сталі 45 після термообробки НКС 45... 50 і на порядок вище мікротвердості міді М1 у вихідному стані.

Слід зазначити, що при тривалій обробці чавуну електродом з міді (рис.4/4) поверхня чавуну все більше збагачується міддю, яка на мікрослідах набуває «сірого» кольору (лінія а-б). Під "сірим" шаром утворюється "білий" шар з мікротвердістю "б-в" і товщиною "в-г" і термодифузійною зоною "д-е-ж".

Таблиця 4.2

## Мікротвердість покриття та основного металу

Сполучені метали	Мікротвердість покриття вздовж зони з'єднання Нц, Н/мм <sup>2</sup>				Мікротвердість покриття Нц, Н/мм <sup>2</sup>	Твердість покриття, HRC <sub>E</sub>	Мікротвердість основного покриття, Нц, Н/мм <sup>2</sup>	Мікротвердість електрода, Нц, Н/мм <sup>2</sup>
	1	2	3	4				
	СЧ21+М1	4290	4480	4730				
СЧ21+У10	6690	6440	6440	6440	6820-7590	56-59	3400-3510	2750-3300
СЧ21+СВ08ГС	4290	4120	4290	4230	4200-4780	42-45	3400-3510	1450-1510
СЧ21+65Г	6370	6300	6320	6700	6230-7420	52-57	3400-3510	2000-2210
СЧ21+Ст.3	4100	4300	4020	4000	4000-7600	48-54	3400-3510	1200-1600
СЧ21+Бр.ОФ 10-1	3120	3400	3420	3050	3200-3600	40-42	3400-3510	670-700
СЧ21+Бр.ОЦС 5-5-5	3900	3710	3900	3790	3820-4000	41-44	3400-3510	740-760

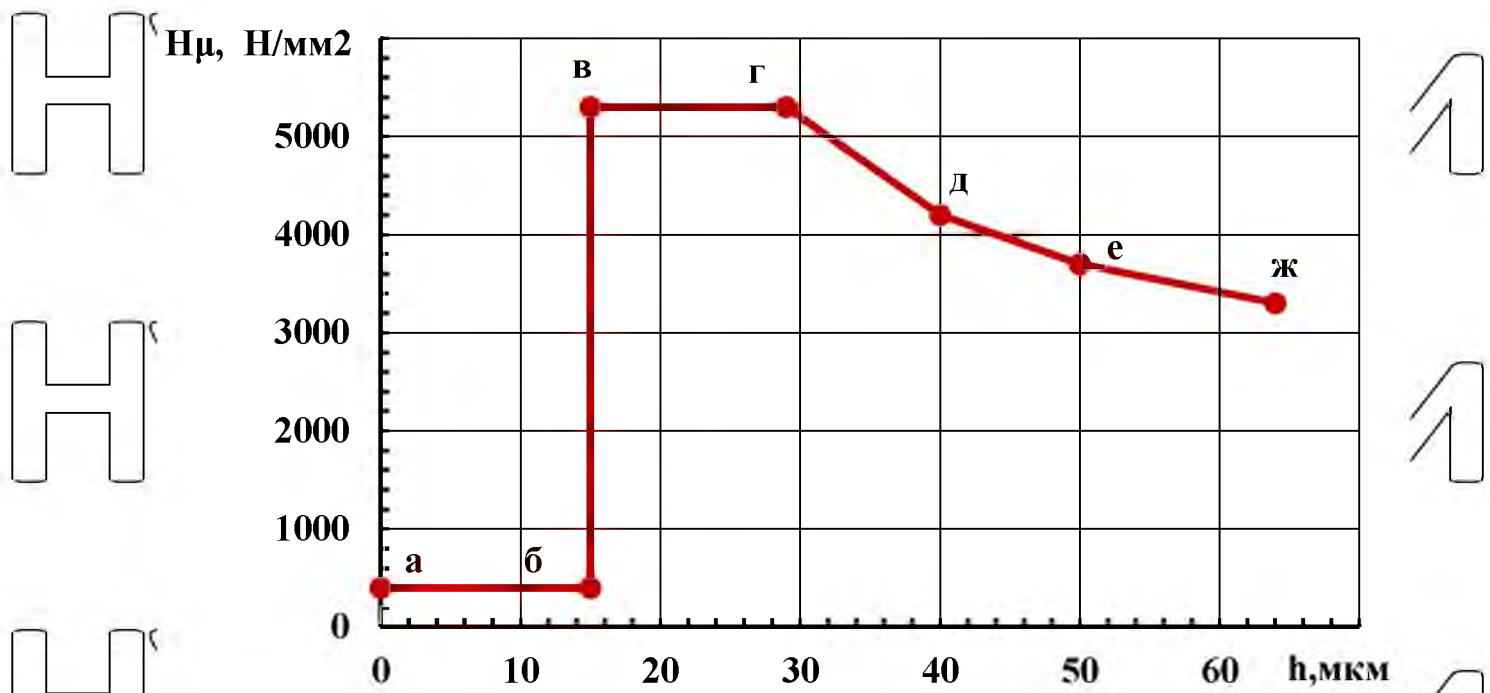
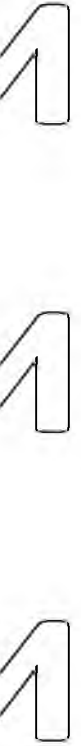
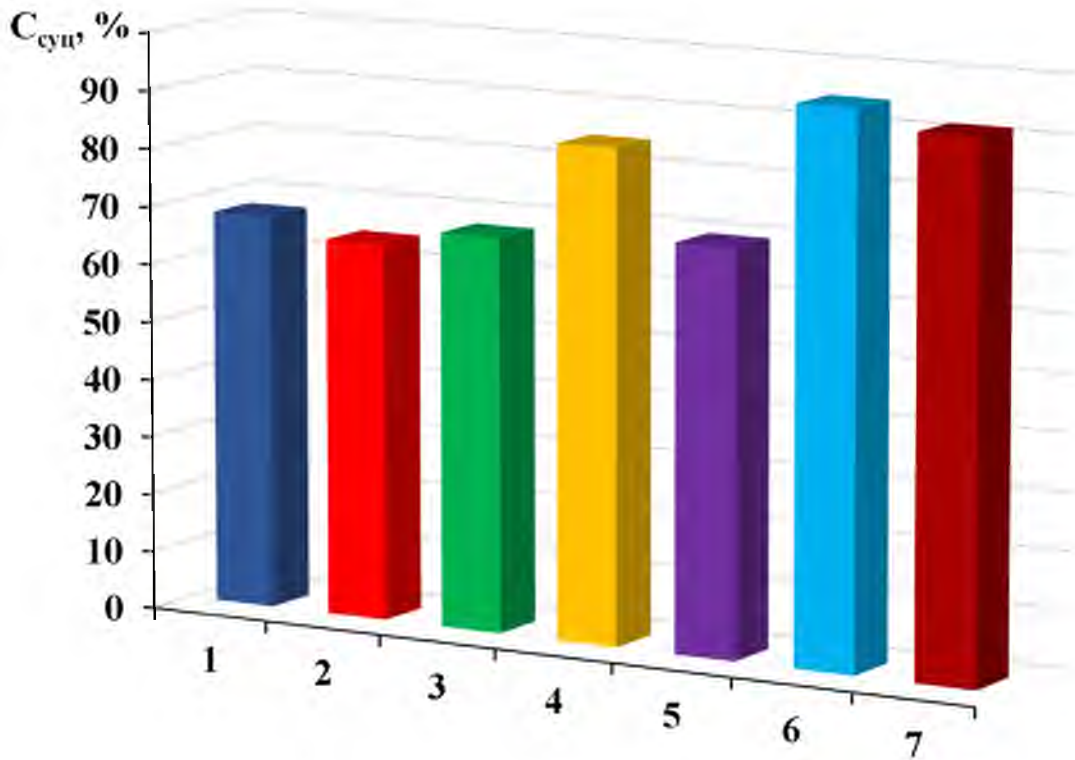
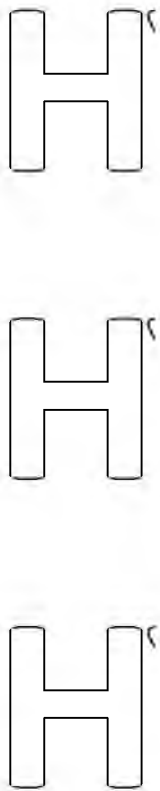


Рисунок 4.4 - Розподіл мікротвердості за товщиною нанесеного шару з міді М1 (катод СЧ21)

Мікротвердість основного металу (СЧ21), незалежно від матеріалу електрода, практично не змінювалася і дорівнювала його мікротвердості у вихідному стані  $H_{\mu} = 3400 \dots 3510$  Н/мм<sup>2</sup>.

Суцільність покриттів вздовж зони з'єднання для всіх досліджених поєднань металів становить 65...95% (рис 4.5.). Найбільшу суцільність мають покриття, отримані при ЕІН сталлю У10, Ст3, низьковуглецевим зварювальним дротом СВ08Г2С і міддю М1, значення якої відповідно 93%, 85%, 70%, 95%. Найменшу суцільність мають покриття зі сталі 65Г - 65%, бронз: Бр.ОФ 10-1 - 68%, та Бр.ОЦС 5-5-5 - 68%.



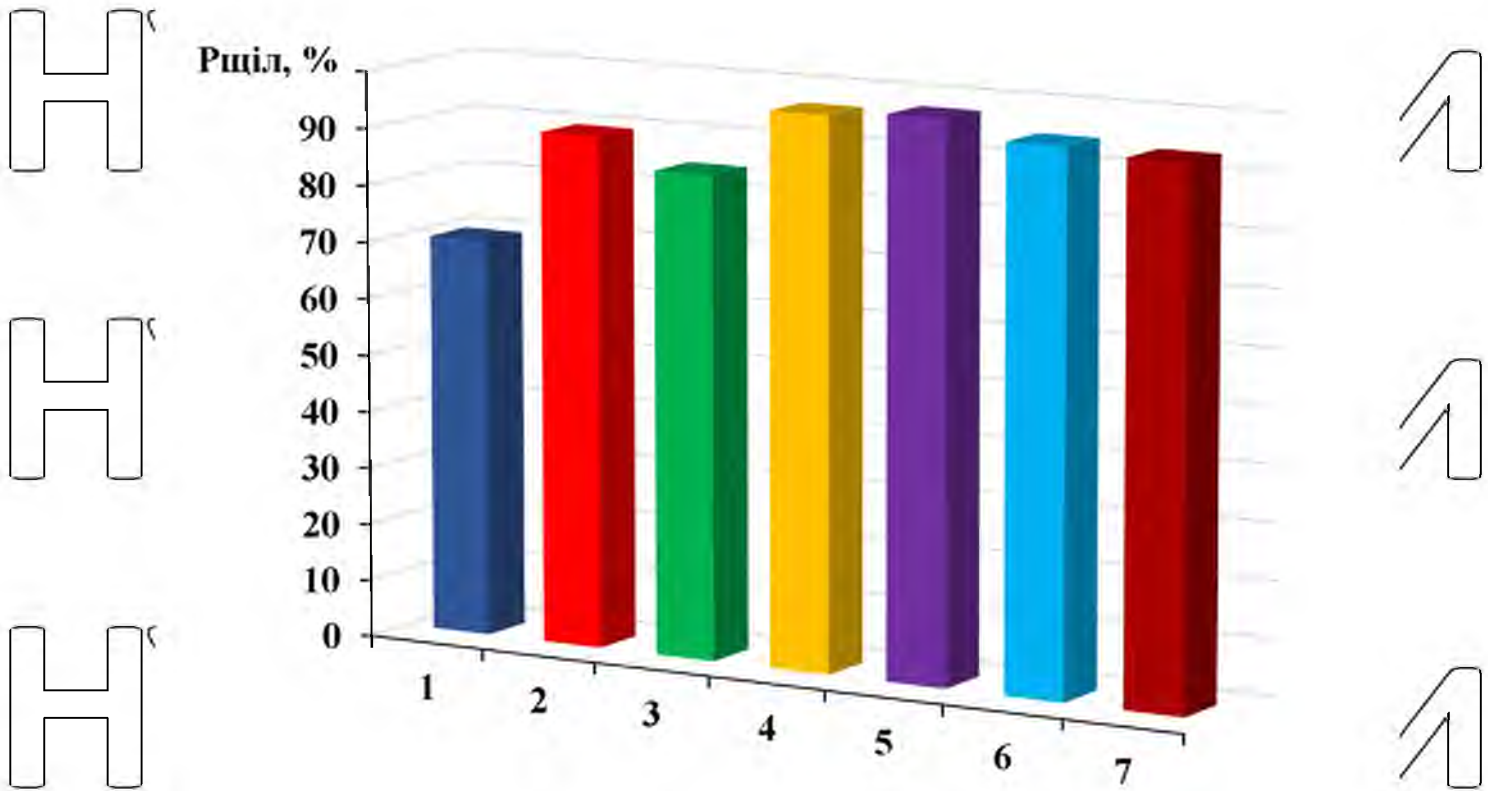
1. 15X - СЧ21 + Бр.ОФ10-1; 2. 15X - СЧ21 + 65Г; 3. 15X - СЧ21 + Бр.ОЦС5-5-5;  
4. 15X - СЧ21 + Ст.3; 5. 15X - СЧ21 + СВ08Г2С; 6. 15X - СЧ21 + М1;  
7. 15X - СЧ21 - У10

Рисунок.4.5 - Вплив матеріалу електрода на щільність покриттів при ЕІН.

Вплив матеріалу електрода на щільність покриттів, представлений на рис.4.5, показує, що щільність покриттів всіх досліджуваних поєднань сплун матеріалів досить висока і становить 70-98%. Бр.ОФ 10-1 - 70 %, 65Г - 90%, Бр.ОЦС 5-5-5 - 85%; Ст3 - 95%; СВ08Г2С - 98%; М1 - 93 %; У10 - 93%.

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що для поєднань матеріалів, розглянутих у роботі, покриття отримані ЕІН, мають високу мікротвердість, стабільну по всій довжині зони з'єднання з основним металом. При цьому отримані покриття з низьковуглецевого дроту СВ08Г2С і сталі 3 мають мікротвердість 2,9, сталі 65Г в

НУБІП України



1. 15X - СЧ21 + Бр.ОФ10-1; 2. 15X – СЧ21+65Г; 3.15X-СЧ21+Бр.ОЦС5-5-5;  
 4. 15X-СЧ21-Ст.3; 5. 15X-СЧ21-СВ08Г2С; 6. 15X-СЧ21-М1;  
 7. 15X-СЧ21-У10

Рисунок 4.6 - Вплив матеріалу електрода на щільність покриттів при ЕІН

Дослідження зони з'єднання зразків показали, що для всіх аналізованих поєднань металів, що з'єднуються, дефекти типу пор і тріщин в зоні з'єднання покриття з основним металом відсутні, а сама зона з'єднання являє собою явну виражену в площині контакту кордон, що сформувалася в результаті утворення міцних хімічних зв'язків між поверхнями, що з'єднуються.

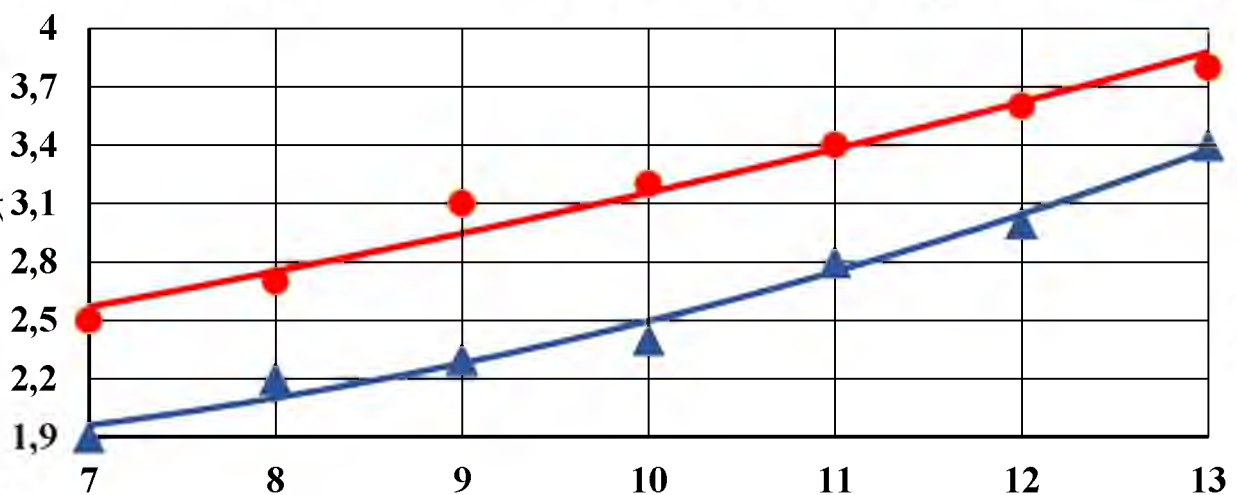
Для всіх досліджених поєднань металів мікротвердість покриттів залежить від їхньої структури, яка для поєднань матеріалів, що мають однорідний або близький хімічний склад, являє собою або легований аустеніт, або безструктурний мартенсит, або легований аустеніт плюс безструктурний мартенсит, а для поєднань з різнорідних матеріалів - твердий розчин легуючих елементів. Так покриття з міді М1 є твердим розчином міді в залозі.

Встановлено, що щільність покриттів, отриманих ЕН, незалежно від матеріалу, що наноситься, становить  $P_{\text{щіль}} = 70-98\%$ , при їх щільності вздовж зони з'єднання  $S_{\text{вн}} = 65-95\%$ , причому щільність вище  $90\%$  маєть покриття зі сталі У10 і міді М1.

#### 4.3. Результати стендових та експлуатаційних випробувань відновлених гідророзподільників

Випробування та перевірка на гідрошільність відновлених сполук проводилася згідно з методикою описаною в п.3.7.

Випробування показали, що виток сполук, відновлених методом ЕН, з технологічним зазором 6-8 мкм при збільшенні тиску в гідросистемі з 7 до 12 МПа знаходяться в межах 1,9-3 мм/хв (рис.4.16), що відповідає допустимому значенню за ТК 70.0001.018-81. Гідроплотність з'єднань відновлених перекомплектовкою, з тим же технологічним зазором при тиску в гідросистемі 7 МПа, нижче в 1,3 рази.



- ▲ - Значення витоків гідророзподільників відновлених методом ЕН
- - Значення витоків гідророзподільників відновлених перекомплектуванням

Рисунок 4.7 - Виток робочої рідини зі збільшенням тиску в гідросистемі при постійному технологічному зазорі

Зниження витоків робочої рідини пояснюється особливостями рельєфу покриттів, отриманих методом ЕН, зокрема, наявністю ненаскрізних масляних кишень.

Експлуатаційні випробування гідророзподільників проводилися з метою виявлення ефективності розробленого технологічного процесу відновлення зношених отворів у корпусах гідророзподільників.

На випробування було прийнято 10 гідророзподільників відремонтованих методом ЕН, та 10 перекомплектуванням, які відповідають технічним вимогам на капітальний ремонт. Відновлені гідророзподільники встановлювали на трактори МТЗ-50 та Т-40 у господарствах Червонослобідського району республіки Мордовія. Результати експлуатаційних випробувань підтверджуються актами, які подано у додатку.

Середнє напрацювання дослідної партії гідророзподільників до відмови становило 6470 мотогодин (нижня довірча межа 6240, верхня 6985 мотогодин), що на 67% вище за напрацювання серійних складальних одиниць.

Таким чином, отримані результати вказують на високу ефективність розробленого технологічного процесу відновлення отворів у корпусах гідророзподільників ЕН та доцільність його застосування. Технологію впроваджено на АТ "Вельський РЗМ" Архангельської області та Червонослобідському РТН республіки Мордовія.

## РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ВІДВЕРДЖЕНЬ У КОРПУСАХ ГІДРОРОСПОДІЛЬОВАЧІВ І ОЦІНКА ЇХ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

### 5.1 Розробка технологічного процесу відновлення отворів у корпусах гідророзподільників електроіскровою наплавкою

Технологічні процеси проектуються відповідно до вимог стандартів ЕСКД та ЕСТД, а також з урахуванням доповнень, роз'яснень та обмежень, викладених у керівних технічних матеріалах та галузевих стандартах.

При проектуванні технологічних процесів ремонту виробу розробляють відповідну документацію за ГОСТ 3.1408-85: маршрутні карти (МК), карти ескізів (КВ), операційні картки (ОК), карти технологічних процесів (КТП), карти типових технологічних процесів (КТТП) та відомості оснастки (ВО).

Вихідні дані для проектування технологічного процесу відновлення отворів у корпусах гідророзподільників:

1. Відомості про дефекти та передбачувану програму відновлення деталей.

Виконані у роботі мікрометражні дослідження показали, що основним дефектом золотникової пари є зношування робочих поясків золотника і корпусу. Коефіцієнт повторюваності дефекту дорівнює 1,0.

Очікувана програма відновлення становила 300 гідророзподільників (900 золотникових пар) на рік.

2. Організаційна форма відновлення деталей.

При розробці технологічного процесу повинні враховуватися можливості ремонтних підприємств та їх технічне оснащення.

3. Вибраний раціональний спосіб усунення дефектів за кожним маршрутом.

Експериментальні дослідження показали, що найоптимальнішим способом відновлення є ЕІН.

3. Схеми технологічних процесів усунення кожного дефекту.

4. План виконання всіх операцій, передбачених маршрутом.

### Проектування маршруту обробки.

При використанні цього технологічного процесу допускається заміна в ньому обладнання та оснащення іншими обладнанням та оснащенням, що забезпечують задані параметри обробки та вимірювання елементів (поверхень).

#### 005. Мийна.

Видалити з відновлених поверхень деталі іржу, бруд, змащення ганчіркою, змоченою в розчиннику (уайт-спирт, ацетон, гас).

#### 010. Дефектувальна.

1. Дефектувати деталі згідно з технічними вимогами на капітальний ремонт ТК 70.0001.018-81.

2. Помітити деталі  $j$  - гідророзподільника,  $g$  - з'єднання.

3. Визначити найбільший діаметр поясків отвору корпусу – розмір

$D_{k \max_{jg}}$ , мм

4. Визначити найменший діаметр поясків золотника – розмір

$D_{z \min_{jg}}$ , мм

5. Визначити остаточний діаметр поясків отвору корпусу та поясків золотника після виведення слідів зносу - відповідно розміри А та В, мм:

$$A = D_{k \max_{jg}} + (\delta_{\max_{k_{jg}}} + \delta_{\max_{k_{jg}}} \cdot 0,3);$$
$$A = D_{z \max_{jg}} + (\delta_{\max_{z_{jg}}} + \delta_{\max_{z_{jg}}} \cdot 0,3);$$

де  $\delta_{\max_{k_{jg}}}$ ,  $\delta_{\max_{z_{jg}}}$  - відповідно максимальне відхилення геометричної форми отвору корпусу та золотника  $j$ - гідророзподільника,  $g$  - з'єднання, мм.

#### 015. Притирання.

1. Виводити сліди зносу та виправляти геометричну форму поясків золотника, витримуючи розмір А.

Режими : частота обертання золотника -  $n_{вр} = 150-200$  об/хв; питомий тиск  $0,8 - 1,5$  кг/см<sup>2</sup>; число подвійних ходів притиру -  $20.., 30$  ход/хв; вихід

притиру за останні пояски золотника - 45...50 мм; рух притира - зворотно-поступальний; час обробки  $t_0 = 8$  хв (визначено хронометражем).

Протерти золотник ганчіркою змоченою в розчиннику.

Зняти золотник.

2. Виводити сліди зношування і виправляти геометричну форму поясків отвору корпусу, витримуючи розмір В.

Режими: питомий тиск  $0,8-1,5 \text{ кгс/см}^2$ ; вихід притира за останні пояски отвору - 45...50 мм; число подвійних ходів притиру - 20...30 ход/хв; рух

притира - зворотно-поступальний з обертанням; час обробки  $t_0 = 10$  хв (визначено хронометражем).

Протерти корпус ганчіркою змоченою в розчиннику.

#### 020. Електроіскрове наплавлення.

1. Встановити корпус у пристосування та закріпити.

2. Нанести на пояски 1; 2 шар товщиною не менше

$h = A - B - S_T + 2Zk_p$  мм на діаметр електродом із міді марки М1  $\varnothing 4-5$  мм.

Режими: режим установки - 5 ( $I = 3,8 \text{ А}$ ;  $V = 96 \text{ В}$ ); амплітуда 8-9;  $t_r = 1,5-2 \text{ хв/см}^2$ ; кут нахилу електрода  $20-35^\circ$  до осі отвору.

3. Повернути корпус на  $180^\circ$ .

4. Нанести на пояски 3,4,5 шар завтовшки не менше

$h = A - B - S_T + 2Zk_p$  мм на діаметр електродом з міді марки М1  $\varnothing 4-5$  мм.

Режими: режим установки - 5 ( $I = 3,8 \text{ А}$ ;  $V = 96 \text{ В}$ ); амплітуда 8-9;  $t_r = 1,5-2 \text{ хв/см}^2$ ; кут нахилу електрода  $20-35^\circ$  до осі отвору.

5. Зняти корпус.

#### 025. Довідкова.

1. Обробити отвір, витримуючи зазор у з'єднанні «золотник-корпус»  $12 \pm 4$  мкм.

Режими: питомий тиск  $Q = 0,8-1,5 \text{ кгс/см}^2$ ; вихід притира за останні пояски отвору - 45...50 мм; число подвійних ходів притиру - 20...30 ход/хв; рух

притира - зворотно-поступальний з обертанням; час обробки  $t_0 = 10$  хв (визначено хронометражем).

Протерти корпус ганчіркою змоченою в розчиннику.

030.Контрольна.

Контролювати з'єднання з гідрощільності. При тиску  $P=7-10$  МПа, витоку не більше  $3 \text{ см}^3/\text{хв}$ .

Вибір засобів технологічного оснащення.

Операція 005. Мийна.

Устаткування. Мийна ванна.

Операція 010. Дефектувальна.

Устаткування. Контрольний стіл ОРГ 1468-01-060А, лекага слюсарні ГОСТ 5698-76.

Вимірювальний інструмент. Мікрометр важільний 25-50

ДЕРЖСТАНДАРТ 11098-75 з точністю 0,001 мм; індикаторний нутромір 18-25 ГОСТ 868-82 з точністю 0,001 мм.

Операція 015. Притирочна.

Устаткування. Верстат слюсарний.

Ріжучий інструмент. Притир чавунний гладкий НВ 100-200 для обробки зовнішніх поверхонь, алмазна паста АСМ 7/5 ГОСТ 9206-80 із зернистістю 5-7 мкм; притир чавунний спеціальний, оброблений молібденом методом ЗІЛ для обробки внутрішніх наскрізних отворів.

Мірливий інструмент. Мікрометр важільний 25-50 ДЕРЖСТАНДАРТ 11098-75 з точністю 0,001 мм; індикаторний нутромір 18-25 мм

ДЕРЖСТАНДАРТ 868-82 з точністю 0,001 мм

Операція 020. Електроіскрове наплавлення.

Устаткування. Установка "Елітрон-22БМ" з ручним вібратором 0531-277.009.

Пристосування. Контувальник.

*Вимірювальний інструмент.* Індикаторний нутромір 18-25 мм ГОСТ 868-82 з точністю 0,001 мм  
Операція 025. Довідкова.

*Устаткування.* Верстат слюсарний.

Ріжучий інструмент. Притир чавунний спеціальний оброблений молібденом методом ЕНІ для обробки внутрішніх наскрізних отворів; ельборова паста ЛПІ М3-М2 ГОСТ 9206-80.

*Контрольний інструмент.* Індикаторний нутромір 18-25 мм ДЕРЖСТАНДАРТ 868-82 з точністю 0,001 мм.

Операція 030 Контрольна.

*Устаткування.* Випробувальний стенд КІ-4815

### **Рекомендації щодо відновлення золотникової пари.**

Основні рекомендації щодо технології відновлення пари зводяться до наступного:

1. До роботи допускаються оператори - зварювальники не нижче третього розряду, які мають не нижче третьої кваліфікаційної групи з електробезпеки, ознайомлені з «Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів» та «Правилами техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів».

2. При відновленні гідророзподільників малими партіями можна відмовитися від складної системи ремонтних розмірів золотників і корпусів, передбаченої чинною документацією. Ремонт раціонально робити, не знеособлюючи з'єднання.

3. При дефектації корпусу для визначення максимального зношування та максимального відхилення геометричної форми отвору достатньо заміряти 2 і 3 пояски в перерізах А-А та Б-Б у двох взаємно перпендикулярних площинах (див. рис.3.3.). При дефектації золотника для визначення максимального зношування та максимального відхилення геометричної форми достатньо заміряти 1 і 6 пояски в перерізах А-А та Б-Б у двох взаємно перпендикулярних площинах (див. рис.3.2.).

4. При відкритті отворів методом ЕІН для зручності роботи рекомендується встановлювати корпус гідророзподільника в центрі токарного верстака (див. рис. 5.1)

5. Робочим матеріалом електрода відновлення отворів методом ЕІН, за результатами експериментальних досліджень обрано мідь марки М1. Поверхні, оброблені міддю, мають кращі триботехнічні властивості. Якщо виникає необхідність нанесення покриттів більшої товщини, потрібно наносити двохшарові покриття: У10+М1; Ст.3+М1; Св08Г2С+М1; 65Г+М1.



Рисунок 5.1 – Базування корпусу гідророзподільника під час обробки отворів методом ЕІН

7. При обробці методом ЕІН необхідно передбачати технологічні перерви або застосовувати примусове охолодження електрода, так як це істотно впливає на якість шару, що формується. При цьому діаметр електрода, в мм, раціонально приймати не нижче за номер режиму установки.

Застосування меншого діаметра електрода сприяє якнайшвидшому перегріву його, що в кінцевому підсумку негативно впливає на якість шару, що формується.

## 5.2. Економічне обґрунтування технології відновлення поршневого

пальця

Для оцінки економічної ефективності вдосконалення технології відновлення гідророзподільників.

Основними показниками економічної оцінки запропонованого методу: сума додаткових капіталовкладень, собівартість умовного ремонту, річний економічний ефект, час ступінних додаткових капіталовкладень, річні продуктивності праці.

Собівартість продукції повинна бути нижчою ніж в діючій дільниці. Це досягається шляхом підвищення технічного рівня виробництва.

## 5.3 Річний економічний ефект

Визначення економічного ефекту від зниження собівартості ремонту за приведеними витратами для майстерні проводимо за наступними формулами

$$E_{p.e.эф.} = (P_{з.іст.} - P_{з.рек.}) \cdot P_{ур.} \cdot ZPH., \quad (5.21)$$

$P_{ур.}$  – програма розбирально-складальної дільниці ремонтної майстерні.

$$P_{ур.} = \frac{31,17 \cdot 200}{300} = 20,78 \text{ ум.рем.}$$

де 300 – трудомісткість одного умовного ремонту.

де  $P_{рек.}$  – приведені затрати існуючої бази.

$$P_{рек} = C'_{ур} + 0,15 \cdot \frac{C_o}{P_{ур}}, \text{ грн.}; \quad (5.22)$$

$$P_{рек} = 279,97 + 0,15 \cdot \frac{308665,5}{20,78} = 2508 \text{ грн.}$$

Після технічного переоснащення майстерні та обґрунтування організаційних параметрів розбирально-складальної ділянки майстерні по ремонту гідророзподільника:

$$P_{исн} = C_{ур} + 0,15 \cdot \frac{C_o}{P_{ур}}, \text{ грн.}; \quad (5.23)$$

$$P_{исн} = 460 + 0,15 \cdot \frac{210008,2}{11,5} = 3199,24 \text{ грн.}$$

Після проведених розрахунків, для розбирально-складальної ділянки з ремонту гідророзподільника маємо:

$$E_{p.c.эф} = (3199,24 - 2508) \cdot 20,78 = 14363,9 \text{ грн.}$$

#### 5.4. Окупність капіталовкладень

Визначаємо за формулою окупність додаткових капіталовкладень:

$$T = \frac{\Delta C_{о.ф}}{E_p}, \text{ рік} \quad (5.24)$$

$$T = \frac{95657,3}{25442} = 3,75 \text{ роки}$$

Таблиця 6.1

Техніко-економічні показники

№ п/п	Найменування	Значення
1	Річний випуск продукції:	
	- у натуральному обчисленні, шт.	200
	- в оптових цінах, грн.	81436

2	Повна собівартість продукції, грн.	55994
3	Основні фонди, грн.	308665,5
4	Загальна площа, м <sup>2</sup> .	287,8
5	Загальна кількість працюючих, чол.	6
6	Прибуток	25442
7	Рентабельність	8,24
8	Коефіцієнт фондівдачі	0,263
9	Випуск продукції на 1м <sup>2</sup> площі	282,9
10	Річний економічний ефект, грн.	14363,9
11	Окупність капіталовкладень, рік	3,75

Річний економічний ефект складає 14363,9 гривень. Витрати на вдосконалення технології відновлення золотників гідророзподільника при капітальному ремонті гідророзподільника зможуть окупитися за 3,75 років

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз мікрометражних даних показав, що ресурс гідророзподільників лімітується низькою зносостійкістю деталей з'єднання «золотник - корпус», коефіцієнт повторюваності дефекту дорівнює 1. Встановлено, що методом перекомплектування можна відновлювати не більше 34% з'єднань, інші 66 % необхідно відновлювати нанесенням. Товщина нанесеного шару повинна компенсувати припуски на виведення слідів зносу та виправлення геометричної форми золотника та отвори корпусу, знос золотника та отвори корпусу; припуск на фінішну обробку відновленого отвору. Для з'єднання з максимальним зношуванням - 0,091 мм необхідно нанести шар товщиною 0,145 мм, з мінімальним зношуванням - 0,021 мм шар товщиною 0,040 мм на діаметр отвору корпусу.

2. Дослідженням умов взаємодії робочих поверхонь деталей вузла тертя «золотник - корпус» гідророзподільника встановлено, що підвищити його зносостійкість можна за рахунок зниження коефіцієнта зовнішнього тертя, підвищення властивостей міцності матеріалу поверхні отвору, зменшення наведеного комплексного параметра шорсткості.

3. Виявлено, що найбільшу швидкість наплавлення при зарядному струмі  $I=0,6$  А, напрузі на накопичувальному конденсаторі 67 В енергії розряду 0,28 Дж має електрод із міді марки М1 - 0,833 мм/хв; при зарядному струмі  $I=2,6$  А, напрузі на накопичувальному конденсаторі 96 В, енергії розряду 0,81 Дж електрод зі сталі 65Г - 3,5 мм / хв і при зарядному струмі  $I=3,8$  А, напрузі на накопичувальному конденсаторі 96 В енергії розряду 1,66 Дж електрод зі сталі 3 - 5,0 мм / хв. Встановлено критерій вибору режимів ЕІН для різних електродів. При цьому застосування електрода, що обертається, збільшує швидкість нанесення покриття в 1,5 - 2,5 рази, а товщину покриття до трьох разів. Встановлено, що електроди з міді дозволяють отримати шар необхідної товщини та суцільності для відновлення зношених з'єднань «золотник-корпус».

4. Встановлено, що нанесений шар складається з трьох зон: оксидів і фрагментів застиглому металу, «білого» шару, що не ґрується, і термодифузійної зони. Структура «білого» шару для поєднань металів, що з'єднуються, з близьким хімічним складом СЧ21 + У10; Св08Г2С; 65Г; Ст.3 є, або легований аустеніт ( $H_{ц} = 3000-6400 \text{ Н/мм}$ ), або безструктурний мартенсит ( $H_{ц} = 5400-9000 \text{ Н/мм}$ ), або легований аустеніт плюс безструктурний мартенсит. Структура «білого» шару, що неґрується, отриманого при ЕПН різнорідних матеріалів СЧ21+М1; БрОЦС 555; БрОФ 10-1 являє собою твердий розчин легуючих або карбідоутворюючих елементів, що входять до складу електродного матеріалу, із залізом, збагаченим вуглецем. Основний метал із чавуну СЧ21 як у вихідному стані, так і після обробки ЕПН має структуру перліту з пластинчастим графітом. Відбілювання чавуну поблизу зони контактування з покриттям відсутнє.

Мікротвердість покриття з міді становить  $4200-5250 \text{ Н/мм}^2$ , що приблизно відповідає мікротвердості сталі 45 після термообробки, і на порядок вище твердості міді у вихідному стані.

5. Мікрогеометричні дослідження показали, що поверхня наплавленого шару утворює нерегулярну шорсткість, однакову у всіх напрямках.

Особливість мікрорельєфу таких поверхонь полягає в утворенні ненаскрізних масляних кишень, що перешкоджає витоку рідини та забезпечує зниження коефіцієнта тертя. Комплексний параметр  $A$  в 1,9 разів менше, ніж у новій поверхні, а після доведення чавунним прикиром - нижче в 21,9 разів, що забезпечує високу здатність відновленого з'єднання.

6. Лабораторні випробування показали, що час приробітку пари тертя «сталеве кільце - сегмент втулки відновлений міддю» скоротилося в 1,6 рази, коефіцієнт тертя в зоні максимальної швидкості відносного ковзання склав 0,118 при коефіцієнті варіації 0,23, інтенсивність зношування з'єднання знизилася в 1,7 рази. Мідний шар зносився протягом 400 годин випробувань на 15 мкм. Виявлено два діапазони контактних тисків - до 9,0 МПа, в межах якого коефіцієнт тертя зі зростанням контактного тиску слабо зменшується і

діапазон у межах 10... 12,5 МПа, де коефіцієнт тертя різко зростає. Коефіцієнт тертя нового з'єднання в межах експлуатаційних тисків (~ 6,0... 8,0 МПа) змінюється від 0,27 до 0,23. У з'єднань з відновленими сегментами втулок коефіцієнт тертя в «мертвих» точках менший у два і три рази.

У процесі випробування виявлено, що до навантаження 27,0 МПа заїдання відновлених пар тертя «кілець-сегмент втулки» не відбувається, а передзадирний стан виникає при навантаженні 11,5 МПа, тобто відновлені пари тертя мають високий запас міцності за критерієм задиростійкості.

7. За результатами експлуатаційних випробувань середній ресурс гідророзподільників з відновленими ЕІН отворами корпусів склав 6470 мотогодин (нижня довірна межа 6240 мотогодин, верхня 6985 мотогодин), що на 67% вище ресурсу серійних складальних одиниць.

8. Річний економічний ефект складає 14363,9 гривень. Витрати на вдосконалення технології відновлення золотників гідророзподільника при капітальному ремонті гідророзподільника зможуть окупитися за 3,75 років

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сучасні способи відновлення зношених деталей машин, ДЕРЖАГРОПРОМ СРСР. – М., 1987. – 29с.

2. Дідур В.А., Малий Ю.С. Експлуатація гідроприводів сільськогосподарських машин. -М.: Россільгоспвидав, 1982. - 127 с.

3. Тихонов А.А. Обґрунтування та розробка технології алітування при ремонті деталей гідроагрегатів сільськогосподарської техніки. - Автореф. дис.-к.т.н., -Нижній Новгород., 1991. -18 с.

4. Дослідження довговічності золотників розподільників гідравлічних приводів та розробка технології їх відновлення. Звіт про НДР (заключний). М.: ВНДІТУВІД «Ремдеталь», № держ. реєстр. 01.9.70008867, інв. № 02.9.90000086, 1998р. 68 с.

5. Якушенкова Т.А. Гідравлічні приводи меліоративних машин. – М.: Колос, 1967. – 187 с.

6. Фрумкіс І.В. Гідравлічне обладнання тракторів, автомобілів та сільгоспмашин – М.: Колос, 1971. – 440 с.

7. Барішев В.І. Підвищення технічного рівня та надійності гідроприводу тракторів та сільгоспмашин в експлуатації. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – М., 1991. – 47 с.

8. Дослідити спосіб і розробити ресурсозберігаючу технологію відновлення корпусів гідророзподільників типу Р75/80. Звіт про НДР. М.: ВНДІТУВІД «Ремдеталь», № держ. реєстр. 01.9.90007044, інв. № 02.20.0000120, 1999.-236 с.

9. Черкун В.Є. Ремонт гідравлічних тракторних систем. – М.: Колос, 1984. – 253 с.

10. Нілов Н.І. Методичні рекомендації щодо технології ремонту гідравлічної апаратури. – М.: Центр науково-технічної інформації та реклами, 1988. – 36 с.

11. М'ясоїдов Н.С. Дослідження зношування золотникових пар розподільників Р75-В3 тракторної гідросистеми. Праці ДОСВІТИ, том 8. М., 1966. - С.57-62.

12. Кирилов Ю.І. та ін Агрегати гідроприводів сільськогосподарської техніки. Технічні вимоги до капітального ремонту. ТК 70.0001.018-81. - М.: ДЕРЖАННІЯ, 1981. - 160 с.

13. Проніков А.С. Надійність машин. - М: Машинобудування, 1978. -

14 Хайкін Е.Л., Лебедев О.В. Основи експлуатації гідроприводів систем машин, що застосовуються в бавовнику. - Ташкент: Фан, 1982. - 144с.

15. Сирицин Т.А. Надійність гідро- та пневмоприводу. - М: Машинобудування, 1981. - 253 с.

16. Іонів П.А. Вибір оптимальних режимів відновлення зношених деталей електроіскровим наплавленням. - Автореф. дис...к.т.н., - Саранськ, 1999. - 18 с.

17. М'ясоїдов Н.С. До методики дослідження зношування золотникових пар розподільників Р75-В3. Праці ДОСВІТИ, том 5, М., 1964.

18. М'ясоїдов Н.С. Дослідження роботи розподільника гідросистем трактора. //Техніка сільському господарстві, № 9, 1964.

19. Борисов Г. А. Дослідження технологічного процесу хромування в саморегулюючих електролітах стосовно відновлення золотникових пар тракторних гідроагрегатів сільськогосподарського призначення. Автореферат дис...к.т.н., - М., 1976. - 16 с.

20. Міклін В.Г. Дослідження та розробка технологічного процесу відновлення тиском прецизійних деталей тракторних гідророзподільників. Автореферат дис...к.т.н., - Саратов, 1983. - 19с.

21. Довідкова книга з оздоблювальних операцій у машинобудуванні. / За ред. Космачова І.Г., Л.: Леніздат, 1966. - 544 с.

22. Бабаєв С.Г. та ін Алмазне хонінгування глибоких та тонких отворів. М: Машинобудування, 1978 - 103с.

23. Хворостухін Л.А., Машков В.М. та ін Обробка металопокриттів вигладжуванням. М: Машинобудування, 1980 - 147с.

24. Бурумкуллов Ф.Х., Величко С.А., Лельчук Л.М. Відновлення корпусів гідророзподільників електроімпульсним легуванням.

25. Лазаренко Б.Р. Інверсія електричної ерозії металів та методи боротьби з руйнуванням електричних контактів. Автореф. дис. ...к.т.н., - М., 1943.-22с.

26. Золотих Б.М. Фізичні засади електроіскрової обробки металів. - М. Гостехиздат, 1953. - 107с.

27. Золотих Б.М. Про фізичну природу електроіскрової обробки металів. - У кн.: Електроіскрове оброблення металів, вип. 1 - М: Вид-во АН СРСР, 1957 - С.38-69.

28. Золотих Б.М., Круглов А.І. Теплові процеси на поверхні електродів при електроіскровій обробці металів. - У кн.: Проблема електричної обробки металів, вип. 1 - М: Вид-во АН СРСР, 1960. - С.65-76.

29. Золотих Б.М. Про розрахунок технологічних характеристик процесу розмірної електроіскрової обробки струмопровідних матеріалів. - У кн.: Проблеми електричної обробки металів, вип. 1 - М: Вид-во АН СРСР, 1960. - С.221-232.

30. Золотих Б.М. Основні питання якісної теорії електроіскрової обробки в рідкому діелектричному середовищі. - У кн.: Проблеми електричної обробки металів, вип. 1 - М: Вид-во АН СРСР, 1962 - С.5-43.

31. Золотих Б.М., Мельдер Р.Р. Фізичні основи електроерозійної обробки. - М: Машинобудування, 1977. - 43с.

32. Некрашевич І.Г., Бакуто І.А. До питання механізму електричної ерозії металів. - У кн.: Зб. наукових праць ФТІ АН БРСР, вип.2. - Мінськ: Вид-во АН БРСР, 1955. - С.167-176.

33. Бакуто І.А. Залежно від електроерозійного ефекту від електричного режиму розряду. - У кн.: Зб. наукових праць ФТІ АН БРСР, вип.5. - Мінськ: Вид-во АН БРСР, 1959. - С.213-222.

34. Некрашевич І.Г., Бакуто І.А. Механізм ерозії металів за електричного імпульсного розряду. - У кн.: 36. наукових праць ФТІ АН БРСР, вип. 6. - Мінськ: Вид-во АН БРСР, 1960. - С.193-215.

35. Некрашевич І.Г., Бакуто І.А. До питання про сучасний стан теоретичних уявлень про електричну ерозію металів. - У кн. Електроіскрова обробка металів. - М.: Вид-во АН СРСР, 1963. - С.24-28.

36. Намітоков К.К. До питання про виникнення та розвиток низьковольтних розрядів. - У кн. Електроіскрова обробка металів. - М.: Вид-во АН СРСР, 1963. - С.44-55.

37. Намітоков К.К. Електроерозійні явища. - М.: Енергія, 1978. - 456с.

38. Красюк Б.О. Дослідження деяких процесів, що відбуваються під час електричної обробки металів. Автореферат дис... д.т.н., - М.: ІМЕТ ім. Байкова, 1950. - 43с.

39. Головейко О.Г. Дослідження процесів на електродах за умов потужного імпульсного розряду. Автореф. дис. к.ф.-м.н. - Мінськ, 1969. - 27с.

40. Буравльов Ю.М., Рудневський Н.К., Грикіт І.А. Спектральний аналіз металів та сплавів. - Київ. Техніка, 1976. - 190с.

41. Левченко О.О. Дослідження фізичних процесів на електродах при іскрових розрядах. Автореф. дис. к.т.н. - Харків., 1963. - 16 с.

42. Бурумкуллов Ф.Х. та ін. Електроіскрова обробка деталей. У кн.: Відновлення та зміцнення деталей машин. Праці ВНДІСУВІД «Ремдеталь». - М.: ДЕРЖАННЯ, 1999. - С.171-203.

43. Сафронов І. І. Дослідження можливості застосування карбідних та сполук титану, ніобію, цирконію та хрому як електроди для електроіскрового легування. Автореф. дис. к.т.н. - Київ, 1967. - 29с.

44. Верхотуров А.Д. Дослідження закономірностей процесу електроіскрового легування поверхонь тугоплавкими металами та сполуками. Автореф. дис. к.т.н. - Київ, 1971. - 34 с.

45. Сичов В.С. Дослідження електроіскрового легування перехідних металів четвертої – шостої груп тугоплавкими боридами. Автореф. дис. к.т.н. – Київ, 1973. – 17 с.

46. Коробейник В.Ф. Підвищення стійкості матеріалу прокатних валків методом електроіскрового легування. Автореф. дис. к.т.н. – Харків, 1980. – 24 с.

47. Михайлюк О.І. Вплив електроіскрового легування металевих поверхонь на їхню зносостійкість. Автореф. дис. к.т.н. – М., 1990. – 16 с.

48. Терьохів Д.Ю. Оптимізація технології відновлення чавунних колінчастих валів плазмовим напильником з одночасним електроіскровим легуванням покриттів. Автореф. дис. к.т.н. – Ульяновськ, 1990. – 26 с.

49. Міткевич С.П. Зносостійкість поверхневого шару чавуну після електроімпульсного зміцнення. Зб. наукових праць ФТІ АН БРСР, вид. 3. Мінськ: Вид-во АН БРСР, 1956. – 3.252-260.

50. Улицький Є.Я. Електроіскрове покриття різального інструменту. Автореф. дис. к.т.н. – М., 1951. – 26 с.

51. Анагорський А.А. Електроіскрове зміцнення інструменту. Автореф. дис. к.т.н. – М., 1953. – 16 с.

52. Петруха П.Г. Автоматизація процесу електроіскрового зміцнення та вплив цього процесу на ріжучі властивості інструменту. Автореф. дис. к.т.н. – М., 1952. – 12 с.

53. Поляченко О.В. Дослідження електроіскрового зміцнення як способу підвищення зносостійкості деталей тракторів при ремонті. Автореф. Дис. к.т.н. – М., 1953. – 16 с.

54. Кривець П.І. Дослідження основних факторів електроіскрового зміцнення штампів. Автореф. дис. к.т.н. – Мінськ, 1953. – 14 с.

55. Алієв А.Е. Зміцнення та відновлення шпинделів бавовняної машини СХМ-48 електроіскровим методом. Автореф. дис. к.т.н. – Атихабат, 1953. – 16 с.

с.

56. Белянін В.А. Дослідження деяких властивостей поверхневих шарів конструкційної сталі після електроіскрового зміцнення. Автореф. дис. к.т.н. – М., 1955 – 10 с.

57. Гітлевич А.Є., Михайлов В.В., Царканський Н.Я., Ревутський В.М. Електроіскрове легування металевих поверхонь. За ред. академіка АН МРСР Ю.М.Петрова. – Кишинів: Штіінця, 1985 – 196 с.

58. Іванов Г.П. Технологія електроіскрового зміцнення інструментів та деталей машин. – М: Машгіз, 1961. – 303с.

59. Верхотуров А.Д., Муха І.М. Технологія електроіскрового легування металевих поверхонь. К.: Техніка, 1982. – 181 с.

60. Бурумкулов Ф.Х., Біляков А.В., Лельчук Л.М., Іванов В.І., Відновлення та зміцнення деталей електроіскровими методами. //Зварювальне виробництво, 1999 №2, с.5-6.

61. Аблаєв А.А., Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Л.М. Відновлення гільз циліндрів високооборотних двигунів. У кн.: Шляхи вдосконалення технічної експлуатації та ремонту машин. – Володимир: Вид-во Володимирського держуніверситету, 1999. – С.24-26.

62. Бурумкулов Ф.Х. Відновлення та зміцнення гільз циліндрів електроімпульсним методом. У кн.: Відновлення та зміцнення деталей – сучасний ефективний спосіб підвищення надійності машин. – М.: Изд-во ЦРДЗ, 1997. – С.87-89.

63. Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Л.М., Величко С.А. Відновлення корпусів гідророзподільників електроімпульсним легуванням. У кн.: Відновлення та зміцнення деталей – сучасний ефективний спосіб підвищення надійності машин. Тези семінару. – М.: ВНДІТУВІД «Ремдеталь», 1998. – С.15-17.

64. Бурумкулов Ф.Х., Андреева А.Г., Беляков А.В., Бушма П.А., Лельчук Л.М. Легування робочої поверхні поршневих кілець електроіскровим методом. //Технологія металів, №3 1999 №2, с.24-28.

65. Аблаєв А.А., Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Л.М. Спеціальні покриття на кільцях автотракторних двигунів. У кн.: Шляхи вдосконалення технічної

експлуатації та ремонту машин. – Володимир: Вид-во Володимирського держуніверситету, 1999. – С.26-29.

66. Бурумкулов Ф.Х., Беляков А.В., Лельчук Л.М., Рамос Л. Технологія електроіскрового легування нових та відновлених двигунів. У кн.: Відновлення та зміцнення деталей – сучасний ефективний спосіб підвищення надійності машин. - М.: Вид-во ЦРДЗ, 1997. - с.83-85

67. Бурумкулов Ф.Х., Бушма П.А., Лельчук Л.М. Зміцнення поверхонь високонавантажених партертя електроіскровим легуванням. //Важке машинобудування, 1999 №2, с. 5-6.

68. Бурумкулов Ф.Х., Біляков А.В., Лельчук Л.М., Іванов В.І., Зміцнення та відновлення елементів гвинтових передач електроіскровим легуванням //Технологія машинобудування, 1999 №2, с.24-28.

69. Бурумкулов Ф.Х., Латипов Р.А., Лельчук Л.М., Зміцнення стрічкових пилок для різання деревини електроімпульсною обробкою. //Зварювальне виробництво, 1997 №10, с.37-39

70. Бурумкулов Ф.Х., Іванов В.І. Відновлення та зміцнення розділових штампів. У кн.: Відновлення та зміцнення деталей машин. Праці ВНДІТТУВІД «Ремдеталь». -М.: ДЕРЖВИТИ, 1999. - С. 203-215.

71. Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Л.М., Іванов В.І., Тимошенко В.М., Рамос Л. Підвищення ресурсу ріжучих елементів сільськогосподарської техніки. У кн.: Відновлення та зміцнення деталей – сучасний ефективний спосіб підвищення надійності машин, - М.: Вид-во ЦРДЗ, 1997.С.81-83.

72. Бурумкулов Ф.Х., Іванов В.І. Проблеми відновлення та зміцнення розділових штампів. У кн.: Стан та перспективи відновлення, зміцнення та виготовлення деталей. Матеріали науково-практичної конференції. - М.: ДЕРЖАННЯ, 1999. - С.17-21.

73. Бурумкулов Ф.Х., Слов'яський А.А., Іванов В.І., Філіпцов А.Є. Проблеми зміцнення буряків ножів. У кн.: Стан та перспективи відновлення, зміцнення та виготовлення деталей. Матеріали науково-практичної конференції. - М.: ДЕРЖАННЯ, 1999. - С.7-10.

74. Бурумкулов Ф.Х., Бушма П.А., Беляков А.В., Лельчук Л.М., Іванов В.І. Сучасні електроімпульсні установки для відновлення та зміцнення деталей. - В. кн.: Сучасні матеріали, обладнання та технологія зміцнення та відновлення деталей машин. – Новополюцьк, 1999. – С. 219-222.

75. Бурумкулов Ф.Х., Лезін П.П., Іванов В.І., Іонов П.А., Гришин Н.Г. Застосування ТТ та КС – генераторів імпульсу струму в установках ЗІЛ при відновленні та зміцненні зношених деталей. У кн.: Забезпечення надійності та машин при експлуатації та ремонті. Матеріали всеросійської науково-практичної конференції. – Саранськ, 1998. – С.58-60.

76. Бурумкулов Ф.Х. Використання електроіскрового методу для відновлення та зміцнення деталей сільськогосподарської та машин для переробки сільськогосподарської продукції. //Вісник ЧДАУ, 1998, т.23, с.24-28.

77. Бурумкулов Ф.Х., Величко С.А., Іонов П.А., Лельчук Л.М. Вибір електродів для відновлення золотників електроімпульсним легуванням. - В. кн.: Сучасні матеріали, обладнання та технологія зміцнення та відновлення деталей машин. – Новополюцьк, 1999. – С. 42-43.

78. Величко С.А., Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Л.М. Експериментальна оцінка часу електроіскрового наплавлення різних електродів на чавунні деталі. У кн.: Стан та перспективи відновлення, зміцнення та виготовлення деталей. Матеріали науково-практичної конференції. - М.: ДОСІІТІ, 1999. – С.151-154.

79. Лазаренко Н.І. Спосіб виготовлення матриць пуансонів (електроіскровий). Кандидатська дисертація у вигляді наукової доповіді. М., 1962.

80. Алісін В.В., Лаптева В.Г., Добринін Н.Я. Прогресивні методи випробувань конструкційних матеріалів на зношування. - Вип. 15. М.: Держінті, 1980. – 24 с.

81. Тертя, зношування та змащення. Довідник у двох книгах. / За ред. І. Крагельського, Ст Алісіна, М.: Машинобудування, 1978. - 400 с.

82. Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Л.М. та ін. Теорія та практика оцінки працездатності та довговічності відновлених деталей. - М.: Праці ВНДШТУВІД, 1999. - С.153-171.

83. Гаркунов Д.М., Поляков А.А. Підвищення зносостійкості деталей літаків. М: Машинобудування, 1973. - 200 с.

84. Величко С.А., Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Л.М. Триботехнічні випробування пари тертя «чавунна колодка, на робочу поверхню якої нанесено покриття з різних матеріалів - сталеве кільце». У кн.: Стан та перспективи відновлення, зміцнення та виготовлення деталей. Матеріали науково-практичної конференції. - М.: ДЕРЖВИТИ, 1999. - С.103-105.

85. Верхотуров А.Д., Подчерняева І.А. Електродні матеріали для електроіскрового легування. М.: Наука, 1988. - 224 с.

86. Кучин В.Д., Оздобін І.І., Шастова А.К. Експериментальна перевірка фізичної моделі механізму електричної ерозії матеріалів. //Електронна обробка матеріалів, 1973 №5, с.9-11.

87. Лазаренко Б.Р. Електроіскрова обробка струмопровідних матеріалів -М.: Вид-во АН СРСР, 1959. - 184 с.

88. Лазаренко НІ. Електроіскрове легування металевих поверхонь. - М: Машинобудування, 1976. - 44 с.

89. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сичов В.С. Електроіскрове легування металевих поверхонь Київ: Наукова думка, 1976. - 219с.

90. Бійців А.Г. та ін. Зміцнення поверхонь деталей комбінованими способами. М: Машинобудування, 1991. - 144с.

91. Сафронов Г.В. Електроіскрове легування металевих поверхонь. - Київ: Наукова думка, 1979. - 119с.

92. Сафронов І. І. Технологічні принципи формування високих триботехнічних властивостей відновлених деталей металопокриттями. - Автореф. дис. ... докт. техн. наук. - М., 1991. - 47 с.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП **ДОДАТКИ** України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України