

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

01.12 – КМР. 1854 “С” 2020.11.25. 006 ПЗ

**ШУСТОВА ДЕНИСА ОЛЕКСАНДРОВИЧА**

**2021 р.**

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) \_\_\_\_\_

конструювання та дизайну

УДК 621.793.09

# НУБІП України

**ПОГОДЖЕНО**  
Декан факультету  
конструювання та дизайну  
(назва факультету (ННІ))

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
Завідувач кафедри  
надійності техніки  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_ Ружи́ло З.В. \_\_\_\_\_  
(підпис) (ПІБ)  
" " 2021 р.

\_\_\_\_\_ Новицький А.В. \_\_\_\_\_  
(підпис) (ПІБ)  
" " 2021 р.

# НУБІП України

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему „Підвищення довговічності деталей турбокомпресорів методом електроіскрової обробки”

# НУБІП України

Спеціальність 153 – Галузеве машинобудування (код і назва)

Освітня програма Обладнання лісового комплексу (назва)

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

# НУБІП України

**Гарант освітньої програми**  
\_\_\_\_\_ К.Т.Н., доц. \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_ Тітова Л.Л. \_\_\_\_\_  
(підпис) (ПІБ)

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**  
\_\_\_\_\_ К.Т.Н., доц. \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_ Попик П.С. \_\_\_\_\_  
(підпис) (ПІБ)

**Виконав** \_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_ Шустов Д.О. \_\_\_\_\_  
(ПІБ студента)

# НУБІП України

# НУБІП України

Київ – 2021

# НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет \_\_\_\_\_

конструювання та дизайну \_\_\_\_\_

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри** \_\_\_\_\_

надійності техніки \_\_\_\_\_

к. т. н. доц.  
(науковий ступінь, вчене звання)

Новицький А.В.

(підпис)

(ПІБ)

20 \_\_\_\_\_ року

## ЗАВДАННЯ

### ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Шустову Денису Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність \_\_\_\_\_

133 – Галузеве машинобудування

(код і назва)

Освітня програма \_\_\_\_\_

„Обладнання дисового комплексу”

(назва)

Орієнтація освітньої програми \_\_\_\_\_

освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи „Підвищення довговічності деталей турбокомпресорів методом електроіскрової обробки”

затверджена наказом ректора НУБІП України від “ 25 ” листопада 2020 р. № 1854 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру \_\_\_\_\_

2021.11.15

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: 1. Фізичні основи та сутність реалізації процесу електроіскрової обробки (ЕІО). 2. Класифікація матеріалів з оброблюваності різанням та способи їх механічної обробки. 3. Способи механізованого нанесення покриттів ЕІО на поверхні деталей. 4. Технологічні особливості нанесення покриттів ЕІО. 5. Конструктивні параметри установок для нанесення покриттів на деталі типу «вал», «корпус»). 6. Нормативи затрати матеріалів для проведення технологічного процесу відновлення посадок в корпусних деталях. 7. Нормативні документи з охорони праці та техніки безпеки, які регламентують процеси ЕІО поверхонь деталей сільськогосподарських машин.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналіз конструктивних особливостей деталей турбокомпресорів та факторів, що визначають довговічність їх роботи.

2. Проаналізувати особливості сучасних технологій відновлення та підвищення довговічності деталей турбокомпресорів.

3. Науково обґрунтувати параметри технологічного процесу відновлення роботоздатності турбокомпресорів та удосконалити технологію їх ремонту. Розробити ТП.

Перелік графічного матеріалу (за потреби). Схема установки для ЕІО поверхонь деталей турбокомпресорів.

Дата видачі завдання “ 08 ” вересня 2020 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

Попик П.С.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

(підпис)

Шустов Д.О.

(прізвище та ініціали студента)

# НУБІП України

## ЗМІСТ

ВСТУП..... 6

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ..... 9

1.1. Турбокомпресори дизелів та аналіз причин порушення їх працездатності... 9

1.2. Технології відновлення зношених деталей турбокомпресорів..... 19

1.2.1. Ремонт та відновлення посадкової поверхні валу ротора під підшипник..... 19

1.2.2. Ремонт та відновлення втулок підшипників..... 20

1.2.3. Ремонт та відновлення отвору середнього корпусу під підшипник..... 22

1.3. Електроіскрова обробка металів як спосіб відновлення параметрів зношених деталей..... 23

1.4. Ремонт агрегатів з відновленням розмірів зношених поверхонь електроіскровою обробкою..... 32

1.5. Мета та завдання дослідження..... 35

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТУРБОКОМПРЕСОРІВ..... 36

2.1. Середній ресурс турбокомпресорів, термін служби..... 36

2.2. Навантаження, що діють на підшипники турбокомпресора..... 42

2.3. Способи підвищення довговічності підшипникового вузла турбокомпресорів з моноштулкою, що не обертається..... 44

2.4. Оптимізація технологічних режимів електроіскрової обробки..... 54

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ..... 57

3.1. Програма досліджень..... 57

3.2. Методика проведення мікрометражних досліджень..... 58

3.3. Методика вибору технологічних режимів електроіскрової обробки..... 63

3.4. Методика балансування роторів турбокомпресорів..... 66

3.5. Методика стендових випробувань турбокомпресорів, зібраних із серійних та відновлених деталей..... 71

# НУБІП України

# НУБІП України

3.6. Методика експлуатаційних випробувань відремонтованих турбокомпресорів.....	76
---	----

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ

ДОСЛІДЖЕНЬ.....	78
-----------------	----

# НУБІП України

4.1. Результати мікрометражних досліджень.....	78
--	----

4.2. Вибір раціональних технологічних режимів ЕЮ підшипника турбокомпресора.....	83
--	----

4.3. Раціональні технологічні режими ЕЮ зношених деталей турбокомпресорів.....	86
--	----

# НУБІП України

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ТУРБОКОМПРЕСОРА ТА ОЦІНКА ЙОГО ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	90
--	----

5.1. Розробка технологічного процесу відновлення турбокомпресора методом ЕЮ.....	90
--	----

# НУБІП України

5.2. Розрахунок економічної ефективності розробленого технологічного процесу.....	91
---	----

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	96
--	----

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	98
-------------------------------------	----

ДОДАТКИ.....	126
--------------	-----

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

## ВСТУП

Ремонт сільськогосподарської техніки на 70-80% проводиться з використанням запасних частин. Прості машин через їх відсутність або низьку якість призводять до великих втрат сільськогосподарської продукції. Вартість запасних частин безперервно зростає і тому відновлення зношених деталей із забезпеченням їх ресурсу на рівні нових - один з найефективніших шляхів економії коштів. За даними Держстандарту 85% деталей, при їх дефектуванні, мають зношування не більше 0,3 мм, тобто їх працездатність відновлюється при нанесенні покриттів незначної товщини. Проте ресурс відновлених деталей; в порівнянні з новими деталями, у багатьох випадках залишається низьким.

У той же час, є такі ситуації, коли ресурс деталей, відновлених прогресивними способами, у кілька разів вищий за ресурс нових деталей. При виборі способу відновлення деталей необхідно забезпечити високу якість покриттів, низьку собівартість процесу, мінімальну витрату матеріалів, працета енерговитрат. При цьому слід зосередити свою увагу на таких способах, які підвищують надійність не тільки деталі, але і всієї складальної одиниці в цілому.

Основна тенденція розвитку сучасних тракторних та комбайнових двигунів - підвищення агрегатних потужностей при практичному збереженні їх маси та габаритів за рахунок застосування турбонаддуву. Високі техніко-економічні показники газотурбінного наддуву як способу підвищення потужності на 15...30 % зумовили широке застосування його в автотракторних і комбайнових двигунах. У даний час газотурбінним наддувом забезпечені: всі комбайнові і багато тракторних двигунів (СМД-60/61, СМД-62/63, СМД-64/65, СМД-66/67, СМД-31/32, СМД-17/18 та ін.). Для наддуву цих двигунів використовуються турбокомпресори типорозмірів: ТКР-11 (із зовнішнім; діаметром колеса компресора  $D_k = 110$  мм.), ТКР-9 (з  $D_k = 90$  мм), ТКР-8,5 (з  $D_k = 85$  мм.), ТКР-7 (з  $D_k = 70$  мм).

Досвід експлуатації турбокомпресорів типу ТКР-11, що встановлюється на двигуни СМД-60/61, СМД-62/63, СМД-64/65; СМД-66/67, СМД-31/32, СМД-17/18, ЯМЗ-238НБ, ЯМЗ-240НБ показує, що даний агрегат є найменш довговічним вузлом. Так, за даними Держстандарту, кількість відмов турбокомпресора становить 2...13% від усієї кількості відмов по двигуну. Ресурс відремонтованого турбокомпресора становить лише 62% від нового ресурсу.

Зараз існує два основних напрямки при ремонті зношених деталей" турбокомпресорів. Найбільш поширені методи - встановлення ремонтних деталей, метод ремонтних розмірів, пластичної деформації. Рідше застосовується нанесення на поверхню шару металу, що компенсує величину зносу (гальванічні, наплавні методи).

Усі існуючі методи разом з перевагами мають певні недоліки. При ремонті турбокомпресорів необхідно відновлювати деталі, виготовлені з різних матеріалів (сталі, бронза, алюмінієвий сплав) і різної конфігурації і (площини, циліндричні зовнішні та внутрішні поверхні). У зв'язку з цим, для відновлення зношених деталей необхідна велика номенклатура устаткування, що застосовується.

Тому актуальним завданням є пошук нової технології ремонту турбокомпресора, що забезпечує не менше ніж 90% післяремонтного ресурсу виробу.

Цим вимогам відповідає метод електроіскрової обробки (ЕІО), що дозволяє отримувати поверхні з покращеними фізико-механічними та триботехнічними властивостями. Але до цього часу, цей спосіб для відновлення пари тертя турбокомпресорів не застосовувався.

**Мета дослідження** - підвищення середнього міжремонтного ресурсу турбокомпресорів ТКР-11Н-1 за рахунок створення зносостійких покриттів на зношених поверхнях деталей-методом ЕІО, що забезпечують зниження інтенсивності зношування відновлених пар тертя в 1,2...3 рази.

# НУБІП України

**Об'єкт дослідження** - нові, що надійшли на капітальний ремонт та відремонтовані турбокомпресори ТКР-11Н-1.

**Предмет дослідження** - зношування та відновлювання турбокомпресорів ТКР-11Н-1

# НУБІП України

**Публікації.** За темою магістерської кваліфікаційної роботи опубліковано 2 тези доповідей, які доповідались на 75-й Всеукраїнській науково-практичній студентській конференції «Наукові здобутки студентів у дослідженнях технічних та біоенергетичних систем природокористування:

Конструювання та дизайн» (26-27 березня 2021 року) м. Київ, на VIII

# НУБІП України

Міжнародній науково-технічній конференції «Крамаровські читання» з нагоди 114-ї річниці від дня народження д.т.н., професора Крамарова Володимира Савовича (25-26 лютого 2021 р.), м. Київ.

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України



# НУБІП України

## РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1. Турбокомпресори дизелів та аналіз причин порушення їх працездатності.

Основна тенденція розвитку сучасних тракторних та комбайнових двигунів - підвищення агрегатних потужностей, при практичному збереженні їх маси та габаритів, за рахунок застосування турбонаддуву, що дозволяє значно підвищити їх технічний рівень [29].

Високі техніко-економічні показники газотурбінного наддуву, як способу підвищення потужності 15...30%, зумовив і широке застосування його в автотракторних та комбайнових двигунах; В даний час газотурбінним наддувом забезпечені всі, комбайнові та багато тракторних двигунів (СМД-60/61, СМД-62/63, СМД-64/65, СМД-66/67, СМД-31/32, СМД-17/18, ЯМЗ-238НБ, ЯМЗ-240Н та ін) [6,7,41]. Для наддуву цих двигунів використовуються турбокомпресори (ТКР) типорозмірів: ТКР-11. (з зовнішнім діаметром колеса компресора  $D_k = 110$  мм), ТКР-9 (з  $D_k = 90$  мм), ТКР-8,5 (з  $D_k = 85$  мм), ТКР-7 (з  $D_k = 70$  мм).

Турбокомпресор складається з валу ротора з робітниками-колесами турбіни і компресора, що обертаються: у плаваючому: підшипнику ковзання, нерухомих корпусних деталей, що підводять: випускні гази, що відводять нагнітається повітря і забезпечують подачу мастила; у вузол тертя валу; а також ущільнювальних пристроїв (рисунок 1.1).

На всіх турбокомпресорах, застосовуються плаваючі підшипники ковзання з обертовими втулками (ОВ): або; хитаються; втулками (нерухолива циліндрична моновтулка - НМ) (рисунок 1.2). Підшипники, що плавають, менш схильні до автоколивань, ніж нерухомі, володіють кращими демпфуючими властивостями, більш високою вібростійкістю і несучою здатністю [9,86].

Вузол підшипників із НМ може працювати при радіальних зазорах удвічі більших, ніж вузол підшипників з ОВ. [1]

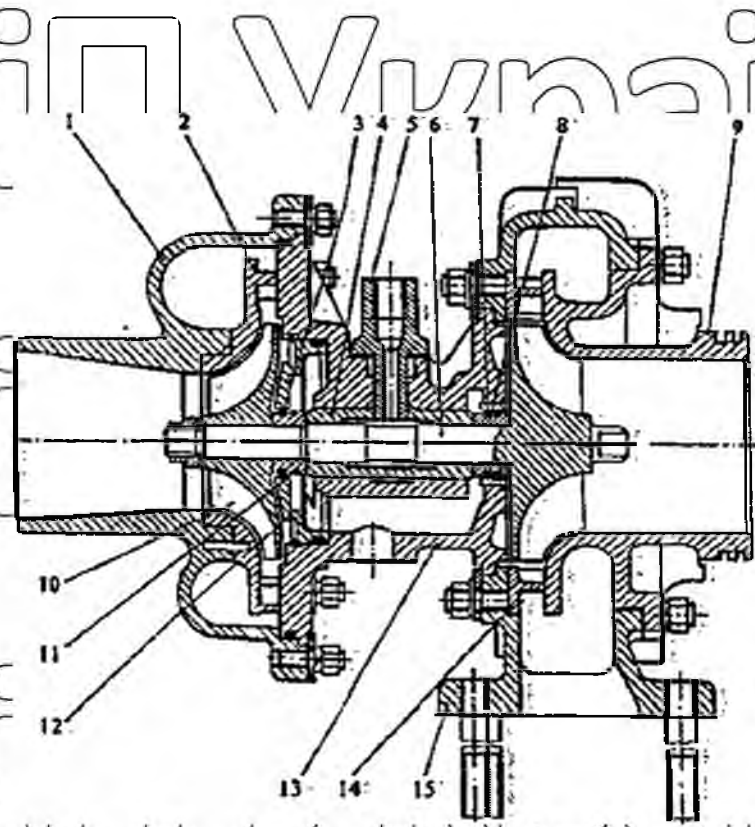


Рис. 1.1. Турбокомпресор ТКР-11Н-2 у зборі

1 - корпус компресора; 2 - вставка компресора; 3 - кільце ущільнювальне (компресора); 4 - підшипник; 5 - фіксатор; 6 - вал ротора в зборі; 7 - кільце ущільнювальне (турбіни); 8 - втулка; 9 - вставка турбіни; 10 - колесо компресора; 11 - масловідбивач; 12 - диск ущільнення компресора у зборі; 13 - корпус середній; 14 - вінець сопловий у зборі; 15 - корпус турбіни.

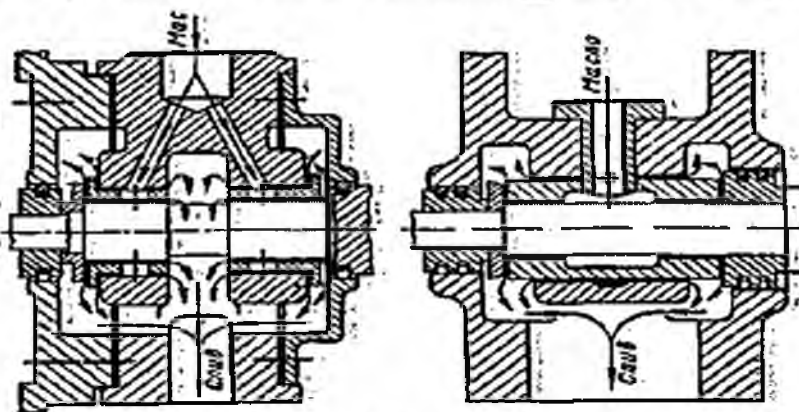


Рис. 1.2. Схеми підшипникового вузла турбокомпресорів

а) - підшипниковий вузол ТКР з СВ; б) - підшипниковий вузол ТКР з

СМД

Схема підшипникового вузла з НМ (турбокомпресори двигунів СМД)

показано малюнку 1.3. Підшипниковий вузол ТКР має два зазори - зовнішній  $S_1$  і внутрішній  $S_2$ .

# НУБІП України

$$S_1 = D_1 - D_2; S_2 = D_3 - D_4$$

де  $D_1, D_2, D_3, D_4$  - діаметри відповідно середнього корпусу, зовнішнього і внутрішнього підшипника, і валу ротора.

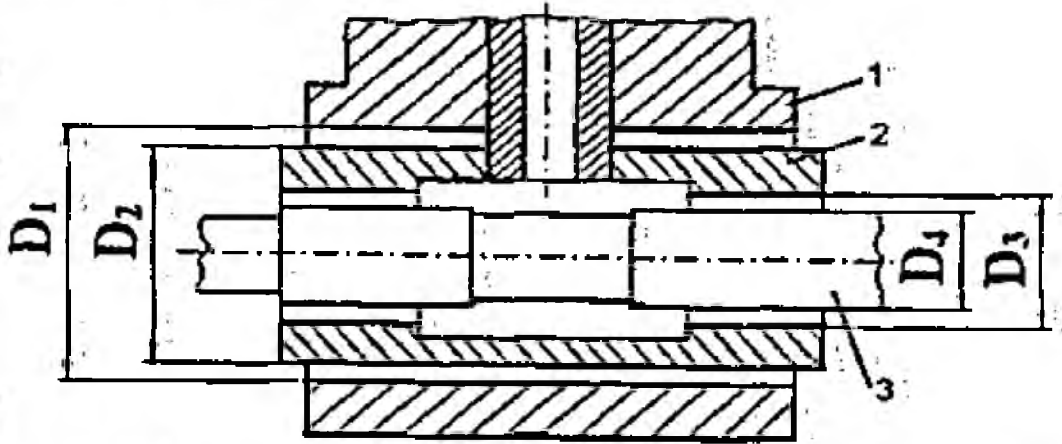


Рис. 1.3. Схема підшипникового вузла з ІМ

1 - середній корпус; 2 - втулка підшипника; 3 - вал ротора

турбокомпресора СМД ТКР-11-Н1

При ремонті турбокомпресорів необхідно враховувати матеріали, з яких виготовлені деталі ТКР (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1.

Матеріали для виготовлення деталей турбокомпресорів ТКР-11

ДВГУНІВ СМД

Деталь	Матеріал	Твердість
1	2	3
Підшипник	Бронза БрОС-10-10 ГОСТ 613-79	
Вал ротора	Сталь 40Г, 50Г, 40Х ГОСТ 4543-81 Сталь 45 ГОСТ1050-88	52 HRC min.
Колесо турбіни -	Сплави ЛЖТ ТУ23-108-90-83, ЖСЛ-750 ТУ23-108-83	187...250 НВ 255...363 НВ
Колесо компресора	Сплав АЛ 4 ГОСТ 2685-75	70 НВ min
Корпус середній	Сплави АЛ-9, АЛ-29, АЛ-4 ГОСТ 2685-75	60 НВ min. 90 НВ min. 70 НВ min
Масловідбивач	Сталь 45Х; 40Х ГОСТ 4543-81	37...44 HRC

Втулка ущільнень, втулка (середнього корпусу)	Сталь 45Х, 40Х ГОСТ 4543-81	39...49 HRC
Диск ущільнення компресора	Сталь 45Х ГОСТ 4543-81, Сталь 45 ГОСТ 1050-88	39...49 HRC
Фіксатор	Сталь 45Л-1ГОСТ 977-88, Сталь 40Л-1, Сталь 50Л-1.	153...200 HB 146...173 HB 159...190 HB

Для втулок підшипників застосовують бронзи марок БрОФ 10-1, БрОФ7-0,2, БрОЦС5-5-5, БрОСЮ-10 [9]; Однак по даним Ханіна Н.С., Аболтіна Е.В., Лямцева Б.Ф. бронзові втулки підшипників ТКР забезпечують високу праяездатність вузла тертя лише за змістом олова не менше 10%. Шорсткість поверхонь бронзових втулок, що сполучаються з іншими деталями  $Ra = 1,25-2,5$  мкм. [92]

Вал ротора зварюється з колесом турбіни зварюванням тертям. Після токарної обробки опорні поверхні, що сполучаються з поверхнею підшипника піддають загартування СВЧ на глибину 1-3 мм, до твердості HRC<sub>3</sub> не менше 52. Потім на круглошліфувальному верстаті шліфуються профіль, зовнішній діаметр і торці колеса турбіни, поверхні валу під втулку ущільнення, підшипник ковзання, масловідбивач, та колесо компресора.

Опорні поверхні під підшипник піддаються алмазному вивалдуванню. Шорсткість цих поверхонь  $Ra 0,32$  мкм (інших шліфованих поверхонь  $Ra 1,25$  мкм), овальність і конусність не повинні перевищувати 0,005 мм [92].

При виготовленні середнього корпусу обробляються: отвір під підшипник середнього корпусу  $Ra 2,5$  мкм, поверхні, що сполучаються з корпусом турбіни і компресора поверхні під диск ущільнення компресора і втулку турбіни, а свердяться отвори під фіксатор і шпильки, нарізається різьба під шпильки.

Масловідбивач загартовується об'ємним гартуванням до твердості 37...44 HRC, отвір під вал ротора шліфується на внутрішньо-шліфувальному верстаті до  $Ra 1,25$  мкм, торці шліфуються на плоскошліфувальному верстаті

до Ra 0,63 мкм) Зовнішню поверхню та канавки (Ra 1,25 мкм) під кільця ущільнювачів обробляють на токарному верстаті [92].

Втулку турбіни гартують об'ємним загартуванням до 39...49 HRC і запресовують в середній корпус, поверхні під кільця ущільнювача шліфують на внутрішньо-шліфувальному верстаті до Ra 1,25 мкм [92].

Досвід експлуатації турбокомпресорів тракторних та комбайнових двигунів ЯМЗ-238НБ, СМД-60, СМД-17КН та ін. показує, що турбокомпресор є одним із менш надійних вузлів. Частка відмов турбокомпресора становить 2...13% від кількості відмов по двигуну. Середні доремонтні і міжремонтні середні ресурси двигунів СМД-60 та ЯМЗ-238НБ та їх турбокомпресорів наведені в таблиці 1.2 [67].

Таблиця 1.2

Середні ресурси двигунів та турбокомпресорів

Марка двигуна	Нові, мото-год.		Відремонтовані мото-год.	
	двигун	турбокомпресор	двигун	турбокомпресор
СМД-60	3800	3140	2200	1950
ЯМЗ-238НБ	4200	3580	3400	2700

Ресурс як у нового так і у відремонтованого турбокомпресора в середньому на 20% нижче за ресурс відповідно нового і відремонтованого двигунів. Ресурс відремонтованого турбокомпресора становить 62% від ресурсу нового.

Слабкими ланками ТКР є сполучення "вал ротора - підшипник" і "зовнішня поверхня підшипника - отвір корпусу", довговічність яких визначає ресурс агрегату.

Турбокомпресори, встановлені на дизелі, працюють спільно з поршневими двигунами і використовують низькотемпературну частину загального теплового напору газів, що відпрацювали. Швидкість обертання ротора ТКР залежить від кількості тиску і температури, поступаючих від

# НУБІП України

двигуна газів, які у своє чергу, залежить від навантаження двигуна і частоти обертання колінчастого вала.

Номінальні частоти обертання роторів сучасних турбокомпресорів досягають  $60000 \text{ хв}^{-1}$ , максимальні - значно вищі. [100] Високий швидкісний режим роботи турбокомпресорів значно посилює умови роботи, як самого ротора, так і деталей, що з ним контактують.

Робочі колеса турбокомпресорів піддаються дії відцентрових сил та пульсуючого тиску газів. Під дією змінних зусиль виникають вібрації диска та лопаток [86]:

У найважчих умовах працює колесо турбіни, що зазнає дії високих нестабільних температур і стрибків тиску. Температура газів перед турбіною при тривалій роботі досягає  $700^\circ \text{C}$ , температура корпусних деталей досягає  $107...147^\circ \text{C}$  з боку компресора і  $670...720^\circ \text{C}$  з боку турбіни [1].

Однією з причин втрати працездатності ТКР є руйнування турбінних коліс через втрату стійкості роботи на деяких режимах, що призводять до помпажу, при якому виникають різкі періодичні коливання тиску та витраги повітря. [35,40] При нагнітанні відбувається значне збільшення амплітуди вібрації лопаток та накопичення в них втомних ушкоджень [30, 37].

Втулка підшипників ТКР сприймає навантаження при обертанні валу ротора як у радіальному, так і в осьовому напрямках. Змащування підшипників здійснюється примусовою подачею оливи під тиском із системи змащення двигуна. Схема торцевого підведення оливи до робочих поверхонь підшипника ТКР двигунів сімейства СМД представлена рисунку 1.26.

На підшипники ТКР у радіальному напрямку діють: вага ротора, сила від тиску відпрацьованих газів, змінна за величиною і постійна за напрямком відцентрові сили неврівноважених мас ротора, сили від гіроскопічного моменту, відцентрові сили, що виникають внаслідок пресесії валу ротора.

У роботі [86] показано, що при розгляді зовнішніх сил, що діють на підшипники, можна враховувати лише відцентрові сили, тому що інші становлять 2...3% від суми відцентрових сил.

# НУБІП УКРАЇНИ

Сили від неврівноважених мас ротора залежить переважно від точності його балансування. Вал ротора в підшипнику внаслідок сил, що виникають від дисбалансу, при режимі роботи, що встановився, описує деяку замкнуту траєкторію, близьку до кругової.

# НУБІП УКРАЇНИ

Нерівність мас і відцентрових сил від неврівноваженості ротора з боку коліс компресора та турбіни призводить до того, що ротор здійснює прецесійний рух, який визначається динамічними характеристиками системи ротор - підшипник - опори. Траєкторія переміщення кінця валу складається з

# НУБІП УКРАЇНИ

високочастотних коливань, що відповідають частоті обертання валу та низькочастотних, що є результатом вібрацій у внутрішньому та зовнішньому шарі мастильного матеріалу вузла підшипників. [1]

# НУБІП УКРАЇНИ

Осьове навантаження на втулку підшипників ТКР виникає від пульсуючих тисків газу та повітря в проточних частинах турбіни та компресора. Під впливом цих сил ротор здійснює коливальний рух уздовж його поздовжньої осі. У пульсуючому потоці газу підшипник навантажується динамічною силою з частотою, що дорівнює частоті роботи циліндрів двигуна.

# НУБІП УКРАЇНИ

Для зменшення попадання оливи в стиснене повітря і відпрацьовані гази, а також для запобігання перетіканню газів, що відпрацювали, в корпус підшипників з боку турбіни і компресора встановлені спеціальні ущільнюючі пристрої у вигляді чавунних пружних кілець (рисунок 1.1, п. 3 і п. 7).

# НУБІП УКРАЇНИ

При роботі турбокомпресора кільця під дією сил пружності притиснуті до поверхні отвору втулки середнього корпусу і не повертаються. Так як осьовий зазор ротора більше, ніж торцевий зазор між кільцями, і стінками канавок під кільця ущільнювачів, то в процесі роботи кільце може переміщатися в осьовому напрямку [86] що призводить до зносу отвору втулки середнього корпусу, що контактує з ущільнювальними кільцями і зовнішнього діаметру кілець. При обертанні валу ротора відбувається знос торцевих поверхонь ущільнювальних кілець і бічних поверхонь канавок під кільця ущільнювачів втулки ущільнення ротора (рисунок 1.1, п. 8) і масло-відбивача

# НУБІП УКРАЇНИ

(рисунок 1.1, п. 14).

# НУБІП УКРАЇНИ

Таким чином зносу деталей газо-масляних ущільнень і виходу їх з ладу сприяють висока частота обертання та автоколивання ротора, коливання ротора від незбалансованих мас, прецесія валу ротора, збільшення радіального

# НУБІП УКРАЇНИ

і осевого зазорів в підшипниковому вузлі в результаті зносів, наявність абразивних матеріалів.

Зношення робочих поверхонь, що сполучаються газо-масляних ущільнень, призводять до великого витoku оливи через ущільнення в бік турбіни або компресора, отже, до втрати працездатності ТКР і його відмові [100].

# НУБІП УКРАЇНИ

Одним із найбільш несприятливих експлуатаційних режимів роботи двигуна, що впливають на надійність вузла підшипників ТКР, є режим пуску, особливо при негативних температурах. При відсутності попереднього прокачування в систему змащення олива до підшипників надходить з деякою

# НУБІП УКРАЇНИ

затримкою і мінімально необхідний тиск мастильного матеріалу 0,15 МПа досягається не раніше ніж через 30 секунд після пуску двигуна [1], що призводить до інтенсивного зношування пар тертя.

# НУБІП УКРАЇНИ

Недостатня подача мастильного матеріалу при високій частоті обертання ротора призводить до втрати його стійкості, зменшення демпфування в підшипниках, в результаті чого зростає амплітуда коливань, у

# НУБІП УКРАЇНИ

тому числі за рахунок наявності незбалансованих мас ротора і прецесії валу ротора. Це призводить до контакту поверхонь тертя валу ротора та підшипника та за наявності в маслі абразивних частинок – до абразивного зносу. При збільшених зазорах в підшипниковому вузлі помітно погіршується герметичність газо-масляних ущільнень, навіть зібраних у відповідності з

технічними вимогами [4].

Провідним видом зношування деталей підшипникового вузла ТКР є абразивний та гідро-абразивний знос. Незважаючи на наявність у більшості двигунів додаткового фільтра очищення оливи перед надходженням її до турбокомпресора, завжди відбувається попадання абразивного пилу в систему змащування ТКР [39, 47]. Розміри частинок залежать від якості фільтрації

# НУБІП УКРАЇНИ



НУБІП УКРАЇНИ

оливи та знаходяться в діапазоні 10...400 мкм. Основною фракцією є частинки розміром 10...150 мкм [1]. Абразивний вплив на деталі ТКР можуть надавати кварцові частинки, металева стружка, продукти корозії тощо.

У підшипникових вузлах ТКР, особливо у зовнішній поверхні підшипника добре помітні сліди кавітаційного зносу [53, 58].

Аналіз роботи та умов навантаження деталей ТКР показує, що пара тертя ковзання «вал ротора - підшипник» схильна до абразивного (у моменти недостатньої подачі мастильного матеріалу, пуск двигуна, різка зупинка двигуна, зниження тиску мастильного матеріалу) і гідро-абразивного (при встановленому режимі роботи) зносу;

- у парах тертя «торцева поверхня підшипника - торцева поверхня масло-відбивача» та «торцева поверхня підшипника - втулка ущільнень ротора» переважає абразивний вид зносу;

- у парі тертя «підшипник - середній корпус» переважає кавітаційний вид зношування;

- у парах тертя «кільце ущільнювальне - канавка масловідбивача» і «кільце ущільнювальне - канавка втулки ущільнення ротора» абразивне зношування;

- у парах тертя "кільце ущільнювальне - диск ущільнення компресора", "кільце ущільнювальне - втулка середнього корпусу" - абразивне зношування;

- у парах тертя «фіксатор - втулка підшипників» абразивний вид зношування та фретинг-знос.

У підшипниковому вузлі деталі, виготовлені з бронзи, зношуються більшою мірою, ніж пов'язані з ними сталеві деталі. Це пов'язано тим, що ця пара тертя є прямою парою тертя [32] і, крім того, «плаваюча» втулка більше ніж вал схильна до абразивного зношування.

У роботах [54, 55] наведено результати обстеження деталей ТКР, які надійшли на капітальний ремонт на ремонтне підприємство Харківської області у 1988 році. Встановлено, що дефекти деталей розподілені так:

# НУБІП України

- збільшений зазор вузла тертя - 70%;
- знос опорних шийок валу - 47%;
- обломи, тріщини колеса турбіни - 7%;

# НУБІП України

- знос ущільнювальних кілець - 10%;
- абразивне знос крильчаток - 7%;
- тріщини валу - 2%.

У роботах [11,12] наведено результати мікрометражних досліджень деталей турбокомпресорів ТКР-11Н-1 і ТКР-11Н-2, що надійшли в капітальний ремонт на ремонтні підприємства Челябінської області в 1998 році.

# НУБІП України

Частка деталей, що підлягають вибракуванню або потребують відновлення, розподілені наступним чином.

- знос опорних поверхонь валу ротора під підшипник - 21,8%;
- знос канавок під кільця ущільнювачів - 69,2%.

# НУБІП України

- сліди зачеплення колесом турбіни за нерухомі деталі - 28,2%;
- знос отвору під підшипник середнього корпусу - 45,1%;
- знос отвору підшипника під вал ротора - 22,8%.

- знос зовнішньої поверхні підшипника - 65,8%.
- знос торцевої поверхні підшипника - 29,1%.

# НУБІП України

- знос канавок під кільця ущільнювачів масловідбивача - 46,2%;
- сліди зачеплення колеса компресора за нерухомі деталі - 39,2%.

Зіставлення результатів дефектації та мікрометражних обстежень деталей ТКР наведених у цих роботах, а також у роботі Баришнікова С.А. [10] показує, що види дефектів та їх частка залежить, від умов експлуатації двигунів (вміст у ґрунті та повітрі абразивних частинок, температурні умови тощо) а також від загального старіння агрегатів двигунів.

# НУБІП України

Отже, представляє практичний інтерес встановлення виду дефектів деталей ТКР та їх розподіл, що виникають при експлуатації двигунів у господарствах Черкаської області, Миколаївській та Одеській областях для

# НУБІП України

# НУБІП України

створення технології ремонту, що забезпечує більш ніж 80% післяремонтний ресурс агрегату.

## 1.2. Технології відновлення зношених деталей турбокомпресорів.

Зараз існує два напрямки відновлення параметрів зношених деталей підшипникового вузла турбокомпресора: встановлення ремонтних втулок і нанесення металопокриття.

### 1.2.1. Ремонт та відновлення посадкової поверхні валу ротора під підшипник.

Вал ротора сьогодні ремонтується такими методами:

1. Шліфування валу на ремонтний розмір.

Цей спосіб відновлення валу ротора поряд з певними перевагами - мала витрата матеріалу і невелика трудомісткість - має наступні недоліки:

- швидкість зносу валу ротора після шліфування на ремонтний розмір вище, ніж у нового валу через те, що параметри шорсткості шліфувальної поверхні валу вищі, ніж у вихідної поверхні;

- перехід на ремонтні розміри валів роторів вимагає застосування ремонтних втулок підшипників, що не випускаються, або виготовлення нових втулок підшипників, або створення технології їх відновлення металопокриттями.

2. Відрізка зношеного валу ротора та приварювання заготовки ротора зварюванням тертям щільно до колеса турбіни з наступною механічною обробкою, загартуванням СВЧ, фінішною операцією шліфування та доведення. [15,99].

Перевага методу полягає в тому, що вал ротора повністю відповідає всім технічним вимогам, що висуваються до нових деталей.

До недоліків методу можна віднести:

- підвищена витрата матеріалу - відрізаний шматок валу викидається в металобрухт, а приварений зварюванням тертям щільно сталевий стержень

# НУБІП України

має великий припуск під механічну обробку, зважаючи на складну конфігурацію валу та високих вимог до точності та шорсткості поверхонь, при подальшій токарній обробці привареного стержня приблизно 50 % його об'єму переводиться в стружку.

# НУБІП України

- велику трудомісткість методу - технологія відновлення включає кілька токарних операцій, шліфування, алмазне вигладжування поверхонь, зварювальну і термічну операції. Причому зварювальна операція вимагає спеціального обладнання.

# НУБІП України

3. Нанесення гальванічних покриттів (хромування або залізнення) з подальшою чистовою обробкою [99].

Перевагами методу є відновлення номінальних розмірів валів та висока твердість одержаного шару.

Водночас процеси залізнення та хромування характеризуються низкою недоліків:

# НУБІП України

- необхідність виконання допоміжних та підготовчих операцій та дорожнього обладнання, що застосовується, у тому числі очисних;

- при експлуатації не рідкісні випадки сколювання електродітичних покриттів, що призводить до прискореного зносу валу та підшипника.

- необхідність дотримання особливих вимог технічної та екологічної безпеки.

# НУБІП України

4. Електроконтактне напікання суміші металевих порошків з подальшою чистовою обробкою та загартуванням СВЧ [10, 66].

Перевага методу полягає у високій продуктивності процесу, малій витраті порошку, регульованій товщині покриття і пористості.

# НУБІП України

До недоліків методу відносяться: економічно ефективна при об'ємі відновлення не менше 3000 деталей на рік.

## 1.2.2. Ремонт та відновлення втулок підшипників.

# НУБІП України

Втулки підшипників турбокомпресорів відновлюють наступними методами:

НУБІП УКРАЇНИ

1. Локальне обтиснення фігурними роликами по зовнішньому діаметру (зі збереженням зовнішнього діаметра в допустимих межах), з наступною механічною обробкою по внутрішньому діаметру [70]. Процес характеризується - високою продуктивністю і застосуванням: нескладного технологічного обладнання. Однак можуть відновлюватися тільки втулки без зношування по зовнішній поверхні.

НУБІП УКРАЇНИ

2. Обтискання на пресі по зовнішньому діаметру з подальшою чорною і чистовою обробкою отвору (у тому числі і під ремонтні розміри валу), торців підшипника і свердлінням отвору під фіксатор [81]. Метод має високу продуктивність, можливість обробки отвору під ремонтні розміри валу. Однак після відновлення отвору під вал ротора необхідно відновлення зовнішньої поверхні втулки, без зношення зовнішньої поверхні.

НУБІП УКРАЇНИ

3. Виливка підшипників із бронзи необхідного складу з наступною; повною механічною обробкою [69]. Переваги методу: відповідність деталей конструктивним вимогам до нових деталей. Недоліками методу є необхідність ливарного обладнання; повна механічна обробка втулки; внаслідок переплавки на ремонтних підприємствах, помітно змінюється склад легучих сплав добавок, що суттєво змінює фізико-механічні властивості матеріалу.

НУБІП УКРАЇНИ

4. Термодифузійне нарощування з наступною механічною обробкою дозволяє з високою продуктивністю відновлювати всі зношуються поверхні втулки підшипників [69]. При цьому деталі повинні бути попередньо розсортовані за величиною зносів внутрішньої і зовнішньої поверхонь (в одній партії деталей величина зношування повинна перевищувати; 0,1 мм); необхідна наявність великої партії відновлюваних деталей; застосування спеціального обладнання; можливий розкид фізико-хімічних властивостей нанесеного шару через зміну хімічного складу робочої суміші.

НУБІП УКРАЇНИ

5. Відновлення зовнішньої поверхні підшипників електроконтактним приварюванням металевої стрічки з подальшим шліфуванням, у тому числі і під ремонтні розміри [66, 81]. Перевагою методу є можливість відновлення всіх підшипників, створювати ремонтні розміри, що дозволяють

НУБІП УКРАЇНИ

використовувати зношені діаметром під підшипник, середні корпуси турбокомпресорів. Недолік методу у тому, що його застосування рентабельне за обсягом відновлення понад три тисячі підшипників на рік [66].

6. Відновлення зовнішньої поверхні підшипника газоплазмовим і газодинамічним напиленням порошків наступним шліфуванням. Гідність методу полягає в можливості багаторазового відновлення зношеної поверхні. Покриття утворене цим методом добре працює на стиск. До недоліків технології відносяться необхідність ретельної попередньої підготовки поверхні (знежирення та механічна обробка, нарізання різьблення), міцність зчеплення на зсув і відрив не перевищує 50 МПа і в динамічних режимах роботи сполучення може відшаруватися. Триботехнічні показники без нанесення спеціального покриття невисокі.

### **1.2.3. Ремонт та відновлення отвору середнього корпусу під підшипник.**

Зношені отвори середнього корпусу під підшипник ремонтують такими методами.

1. Розточуванням отвору і запресуванням ремонтної втулки з наступною обробкою отвору під підшипник. Даний метод дозволяє відновлювати номінальний розмір отвору, а при необхідності перейти до ремонтних розмірів. Недоліками методу є підвищені невиробничі витрати металу під час розточування корпусу та виготовлення ремонтної втулки; розточування отвору середнього корпусу турбокомпресора та запресування втулки значно знижує міцність перемичок навколо отвору, що може спричинити появу тріщин.

2. Формуванням зношеної поверхні композиційними матеріалами на основі. Метод не отримав розвитку через недостатню міцність і крихкість покриттів, внаслідок чого відбувається їх руйнування або відшарування в результаті випадкових ударів при складанні або експлуатації деталі.

3. Електроконтактним приварюванням металеві стрічки. Сутність способу полягає у приварці до зношеної внутрішньої поверхні металічної стрічки. Метод характеризується високою продуктивністю, можливістю змінювати властивості відновлюваної поверхні, шляхом застосування стрічок з різних металів. Недолік методу у тому, що його застосування рентабельне за обсягу відновлення, понад три тисячі корпусів на рік [66].

Основний недолік всіх перерахованих методів полягає в тому, що з їх допомогою неможливо створити поєднання із заданими триботехнічними властивостями з метою підвищення довговічності відремонтованого ТКР. Крім цього необхідно мати один спосіб відновлення зношених поверхонь деталей турбокомпресорів для ремонтного виробництва з обсягом ремонту ТКР до 100 штук на рік. Цим вимогам найбільше відповідає електроіскрова обробка.

За результатами проведеного аналізу пропонується ремонтувати турбокомпресор відновленням параметрів зношених поверхонь: вала ротора підшипника, отвору середнього корпусу під підшипник і ущільнююче кільце, отворів втулки підшипників під вал ротора і фіксатор, зовнішньої і торцевої поверхні втулки підшипників, диска ущільнення компресора під ущільнюючі кільця, масловідбивача по висоті. У деяких випадках, коли відновлення деталей технологічно трудомістко замінювати їх новими деталями.

### **1.3. Електроіскрова обробка металів як спосіб відновлення параметрів зношених деталей.**

У 2003 році виповнилося 60 років тому, що здобуло всесвітнє визнання відкриття радянських учених Б.Р. Лазаренко і Н.І. Назаренко, що електрична іскра може бути використана як технологічний інструмент для обробки металів (А.с. № 70010, 1943 р.). Сутність методу полягає в тому, що під дією імпульсних електричних розрядів, що протікають газовому середовищі відбувається ерозія металоподібних матеріалів-електродів, тобто їх

# НУБІП УКРАЇНИ

руйнування, перенесення та відкладення на поверхні деталі-катода частинок металу [15, 82].

Основними перевагами електроіскрової обробки (ЕІО) металів у газовому середовищі є можливість керувати фазовим складом покриття, використовуючи як електродні матеріали різноманітні метали, їх сплави, карбіди, нітриди, бориди, силіциди, отримувати задану твердість, в тому числі змінюється по глибині покриття, обробляти тільки локальні місця без прогріву всієї маси деталі [26, 46, 74, 83, 87].

Покриття, утворені ЕІО, відрізняються дрібнодисперсною структурою, яка не проявляється при травленні стандартними проявниками, міцним зчепленням з матеріалом основи, а також високою опірністю схоплюванню і корозії, завдяки формуванню «білого шару», що являє собою квазірівноважну систему, поверхнева близька до нуля.

Метод має специфічні особливості [103]:

- матеріал електрода може утворювати на поверхні деталі міцно зчеплений з поверхнею шар покриття, без межі розділу між нанесеним матеріалом і металом основи з дифузиею елементів матеріалу електрода в матеріал деталі;

- процес обробки може відбуватися так, що матеріал електрода не утворює покриття на поверхні деталі, а дифузійно збагачує цю поверхню своїми складовими елементами;

- обробку можна здійснювати в строго зазначених місцях (радіусом від часток міліметра), не захищаючи при цьому решту поверхні деталі;

- відсутнє нагрівання деталі (що викликає зміну фізико-механічних властивостей матеріалу деталі та її структури) в процесі обробки;

- можливість використовувати як обробні матеріали будь-які струмопровідні матеріали (як чисті метали, так і їх сплави, металокерамічні композиції, тугоплавкі з'єднання тощо);

- відсутність необхідності спеціальної попередньої підготовки; оброблюваної поверхні;

# НУБІП УКРАЇНИ



# НУБІП України

- забезпечення екологічної чистоти навколишнього середовища;
- використання для живлення установок побутової освітлювальної мережі.

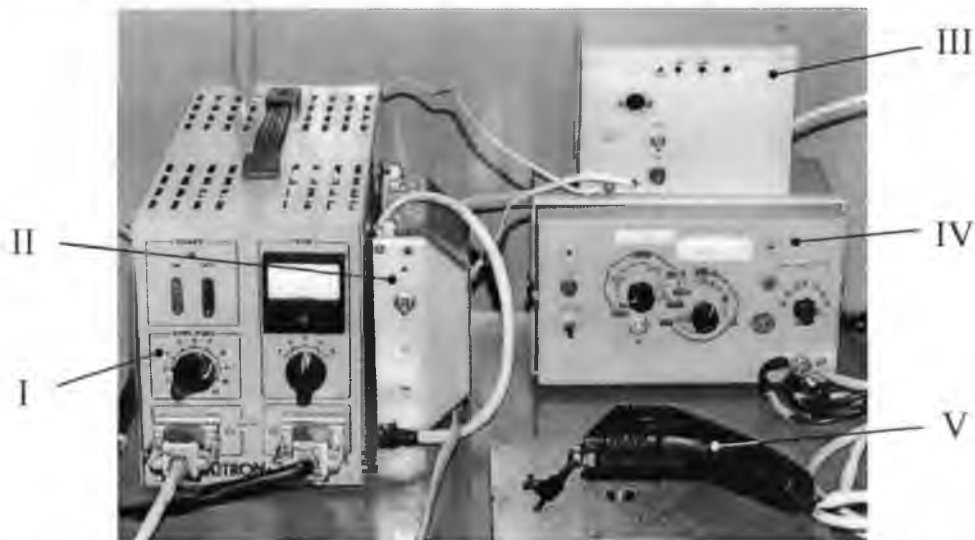
# НУБІП України

Технологія електроіскрової обробки, металевих поверхонь дуже проста, а необхідна апаратура малогабаритна та транспортабельна (рисунок 1.4).

Поверхневий шар, що утворюється в процесі ЕІО, складається зазвичай з трьох зон: зони прилиплих частинок розпорошеного металу, білого шару і зони термічного впливу. Поява зони термічного впливу під білим шаром є наслідком впливу високих температур і газодинамічних сил на поверхневий шар основного матеріалу.

# НУБІП України

# НУ



# НУБІП України

Рис. 1.4. Загальний вид модернізованої установки «Елітрон-22БМ»

I – установка «Елітрон 22Б»; II – блок RC-генератора, III - блок живлення для головки вібробудника зі зворотньо-поступальним та обертальним рухом стрижневого електрода; IV - блок регулювання частоти вібрації, амплітуди коливання електрода та тривалості затримки імпульсів; V-головка вібробудника зі зворотньо-поступальним рухом стрижневого електрода.

# НУБІП України

Поверхнева зона, товщиною до 30 мкм, зазвичай видаляється при доводкових операціях. Товщина «білого» - робочого шару, залежно від режиму та умов обробки, становить від 5 до 350 мкм. Стан граничної зони між «білим» та перехідним шарами визначає міцність зчеплення покриття з

# НУБІП України

НУБІП УКРАЇНИ

осовною. Товщина перехідного шару змінюється від 0,5 до 2 товщин білого шару [103].

НУБІП УКРАЇНИ

Структура і твердість «білого» шару формується в результаті комплексних перетворень оброблюваної поверхні, при цьому твердість може збільшуватися і зменшуватися. Основними факторами, що призводять до зміни структури та твердості поверхні, є термосилова дія імпульсного розряду, гартові явища, утворення хімічних сполук (карбідів, нітридів, інтерметалідів та інших сполук), осадження на поверхні деталі матеріалу електрода. [27,73]

НУБІП УКРАЇНИ

Як показують металографічні дослідження покриттів, утворених ЕІО на сталях, їх твердість залежить також від попередньої хіміко-термічної або термічної обробки та хімічного складу [25,103]. Так, наприклад, нормалізована сталь при ЕІО тією ж сталлю або хромом дає значно вищі і стабільні результати мікротвердості, ніж та ж сталь у стані поставки і термічно поліпшена. І якщо сталі 45 при легуванні хромом кінцева мікротвердість дорівнює 6000 МПа, то сталі 50ХФА (азотованої) вона становить 13000... 14000 МПа [103].

НУБІП УКРАЇНИ

Мікротвердість поверхні та глибина зони термічного впливу залежить від енергії і поодиноких іскрових імпульсів. Так, при: ЕІО сталей та; чавунів твердим сплавом: Т15К6 на режимах з тривалістю імпульсу 40... 150 мкс та енергією розряду 1,0 Дж досягається найбільша мікротвердість, при мінімальній товщині дифузійної (перехідної) зони. Це пов'язано з тим, що матеріал електрода, що переноситься на поверхню, при цих режимах піддається незначним фізико-хімічним перетворенням, а значення і термосилових впливів: на приповерхневі шари матеріалу мінімальні. Зі збільшенням енергії і тривалості розряду твердість поверхневих шарів, сформованих зі сплавів ТК і ВК, зазвичай не перевищує 10000... 12000 МПа, але товщина перехідного шару збільшується.

НУБІП УКРАЇНИ

Фазовими складами структури «білого» шару є мартенсит, аустеніт, карбіди, нітриди та ін. Кількість аустеніту і легуючих елементів в «білому» шарі зростає зі збільшенням потужності електричного режиму.

Хімічний склад матеріалу основи істотно впливає основні характеристики покриттів. Це пояснюється тим, що на мікротвердість покриттів значно впливають легуючі елементи матеріалу основи, які концентруються в білому шарі. Чим більше у складі сталі тугоплавких легуючих елементів із високою вихідною твердістю, тим вище мікротвердість покриттів.

Мікротвердість поверхні характеризує, властивість матеріалів деформуватися або руйнуватися під дією локальних силових впливів. Зв'язок між твердістю матеріалу і межею плинності визначається із співвідношення:

$$\sigma_T \sim 0,35 \cdot H_u$$

де  $H_u$  - мікротвердість по Брінеллю (кулька діаметром 5 мм).

Як правило, електроіскрове покриття виходить досить рівномірним, оскільки за одну секунду обробки переноситься від 100 до 400 порцій електродного матеріалу. За даними Н.І. Лазаренка [63], наприклад, за один імпульс переноситься  $7 \cdot 10^{-7}$  г карбиду вольфраму а на третьому режимі роботи установки «ЭФИ-10М». 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 і 4...5 хвилин обробки. Тому деяка немінучість нерівномірності обробки; розподілу перенесеного матеріалу помітно не відбивається на суцільності отриманого шару.

Пористість покриття, характеризує наявність або відсутність наскрізних каналів, що проходять від поверхні нанесеного шару до основного металу. При електроіскровій наплавці суцільність покриття, як правило, менше 100 %, оскільки уникнути утворення невеликої кількості мікроканалів, що проходять крізь шар покриття, не вдається. Це обумовлено утворенням оксидних частинок, що погано зчеплюються з поверхнею і відколюються від неї, або випадковим пропуском. Крім того, в процесі наплавлення профіль поверхні грубіє, і розряди проходять по вершинах нової, грубішої шорсткості,

# НУБІП УКРАЇНИ

утворюються «зводи», тобто вершини шорсткості замикаються і поглиблення залишаються не обробленими. Ця властивість поверхонь характеризується пористістю покриття.

# НУБІП УКРАЇНИ

На суцільність та пористість шару значно впливає підготовка поверхні перед наплавленням. Хоча знежирювати або протруювати поверхні перед обробкою не потрібно, але оксидні плівки повинні бути видалені. Чим нижче шорсткість поверхні, що підлягає ЕІО, тим вища суцільність і, менше пористість покриття. Так зі збільшенням параметра  $Ra$  з 4 до 12 мкм товщина покриття знижується до двох разів, суцільність покриття до чотирьох разів.

# НУБІП УКРАЇНИ

Тому поверхня має бути відшліфована до  $Ra \leq 1,25$  мкм [63, 94].

# НУБІП УКРАЇНИ

За даними численних експериментів встановлено [33, 60] і що міцність на зріз покриттів складає від 45 МПа (електрод вольфрам, матеріал Ст3) до 95 МПа (електрод тантал, матеріал Ст3) і доходить до 250 МПа, а міцність на відрив тих самих матеріалів від 25 МПа до 85 МПа [31,77];

# НУБІП УКРАЇНИ

Основними факторами, що визначають міцність зчленення покриття з основою та її контактну втому, є крихкість і меншлітність нанесеного шару. Як правило, покриття витримують значні ударні навантаження і вигини, не руйнуючись і не відшаровуючись від основи. Так, наприклад, за даними роботи [103], у склянок кардана метровагона, виготовлених зі сталі 15Х і

# НУБІП УКРАЇНИ

відновлених покриттям ВК6 товщиною від 50 до 120 мкм, при середньому пробігу в 250 тисяч км., на робочій поверхні, в жодній деталі (52 штуки) не виявлено змін, «оспинок» та відшаровувань від ударних навантажень, тоді як у 100% нових деталей на робочій поверхні виявлено сліди змінання, що по глибині перевищують допустиме значення:

# НУБІП УКРАЇНИ

Мікрогеометрія та здатність електроіскрового покриття. Мікрогеометрія робочої поверхні деталей утворена електроіскровою наплавкою; істотно відрізняється від мікрогеометрії поверхонь, отриманих іншими способами

# НУБІП УКРАЇНИ

(рисунок 1.5). Після згладжування: випадково прилиплих частинок розпорошеного металу на поверхні залишаються скруглені, сферичні виступи і западини, рівномірно розташовані по площі [19, 21].

# НУБІП України

Мікрорельєф поверхні не регулярний з практично однаковими властивостями у всіх напрямках і не має гострих «гребінців» як після механічної обробки [16, 20].

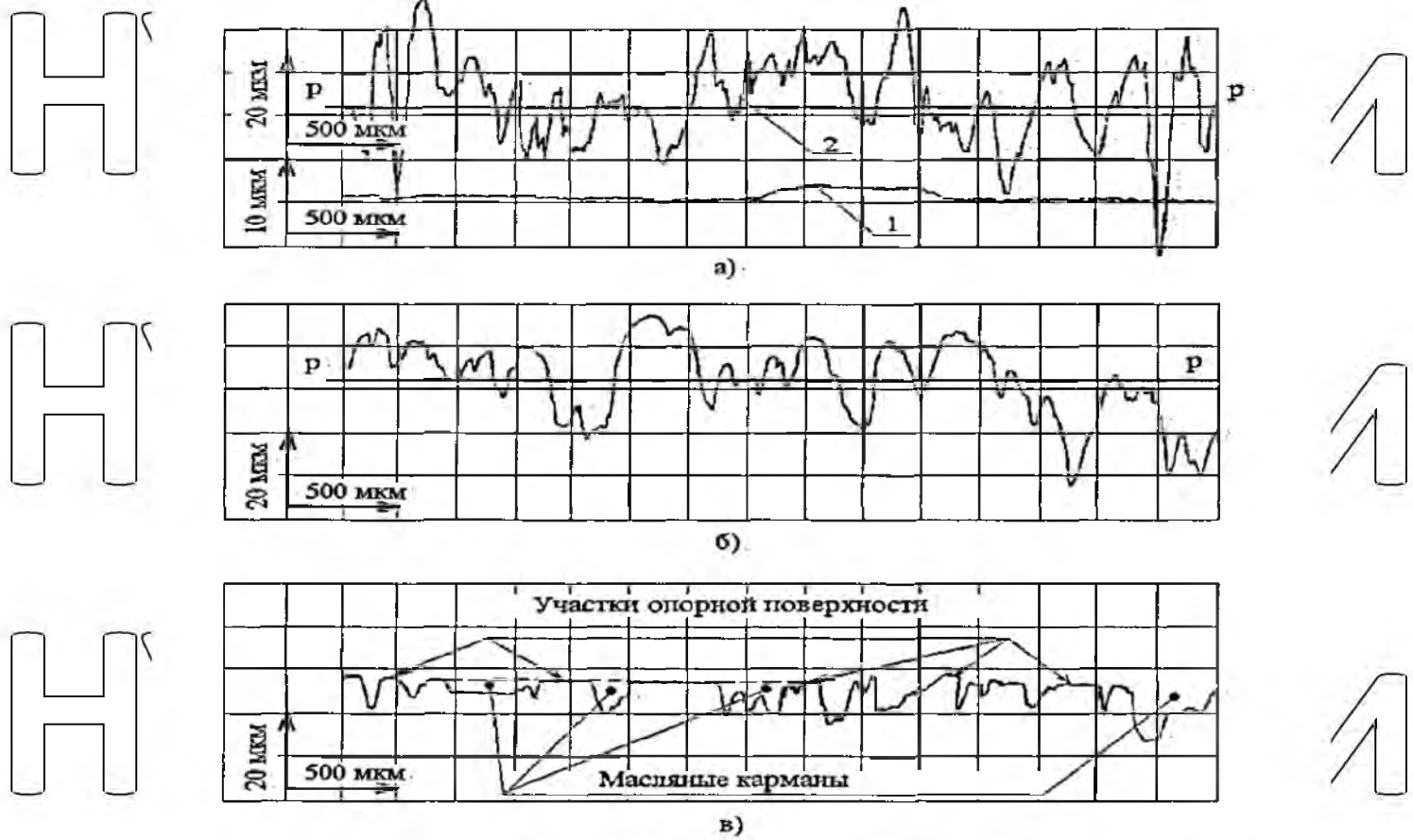


Рис. 1.5. Профілограми поверхні:

а) 1 - вихідний профіль; 2 - профіль після ЕІО; б) 2 - профіль після ППД; в) 2 - профіль після ППД та фінішної обробки (полірування).

Численними експериментами встановлено [103], що несуча здатність покриттів, утворених електроіскровою наплавкою і подальшою поверхнево-пластичною деформацією володіє в два і більше разів кращою несучою здатністю, ніж при інших способах оброблення. параметрами:  $r$ ,  $R_{\max}$  або  $R_z$ ,  $S_m$ ,  $t_p$ ,  $L_6$ , а між масляними каналами -  $R_a$  (ГОСТ 2789-73).

Параметри  $R_{\max}$ ,  $R_z$ ,  $R_p$ ,  $R_a$ ,  $S_m$  та число вершин нерівностей  $n_B$  на базовій довжині  $L_6$  визначаються безпосередньо за профілактограмами, знятими в поперечному та поздовжньому напрямках. Інші параметри розраховуються формулам.



# НУБІП України

Експериментально встановлено, що для забезпечення гарної працездатності пар тертя має дотримуватися такої умови: при  $\frac{u}{R_{max}} \geq 0,3$

відносна опорна довжина поверхні  $t_p$  повинна бути більшою 0,45. [103]

# НУБІП України

Як правило, електроіскрові покриття після наплавлення зазнають пластичної деформації, у результаті утворюються нові поверхні з наявністю умовних гладких зон та зон з масляними каналами.

Зі зростанням ширини і глибини масляних каналів збільшується обсяг мастила, що утримується в масляних каналах, покращуються дисипативні характеристики поверхонь тертя, але при цьому і зменшується відносна опорна площа шорсткості в зоні контакту, що знижує жорсткі характеристики та несучу здатність пари тертя. Тому для кожної пари тертя - існує своє оптимальне співвідношення між опорною поверхнею і поверхнею масляних каналів.

# НУБІП України

Взаємне контактування робочих поверхонь деталей відбувається за виступами мікронерівностей, вершинах хвиль, утворених макронерівностями (рисунок 1.6, 1.7 п.б).

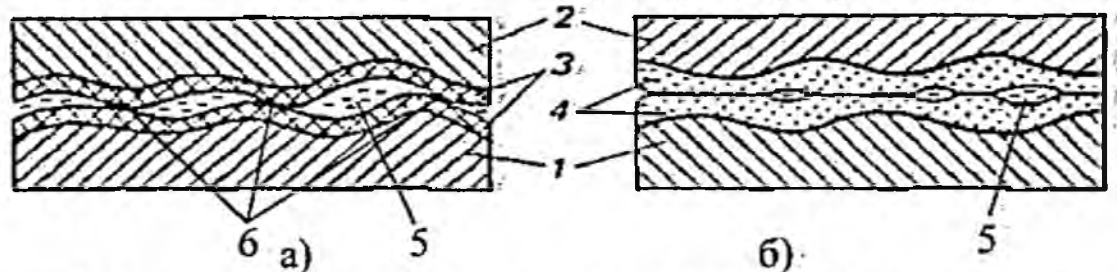


Рис.1.6. Утворення на поверхні контакту деталей при граничному

мастилі (а); за наявності мідного покриття та утворення плівки (б): 1 - сталь;

2 - чавун; 3 - окисні плівки; 4 - квазізріджені мідні та особливі плівки; 5 -

мастило; 6 - мікронерівності

# НУБІП України

При первинному навантаженні відбувається, зазвичай, пластична деформація виступів, тобто. виступи, що входять у дотик, пластично сплющуються з використанням: впроваджується більш твердий виступ або той, якому геометрична форма надає більшого опору деформації.

# НУБІП України

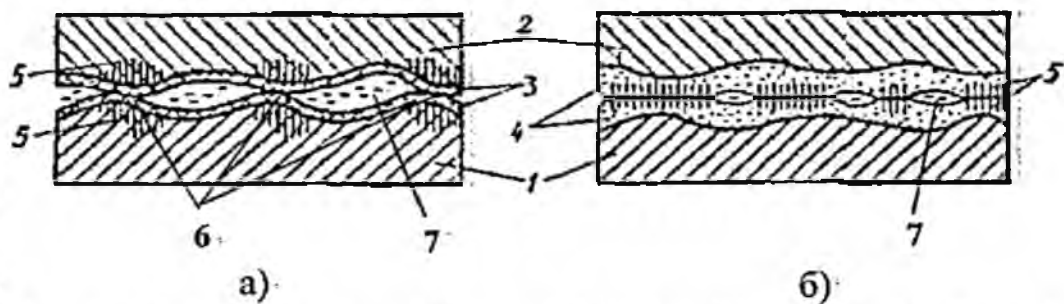


Рис. 1.7. Схема розповсюдження-деформації в місцях контакту при

граничному мастилі (а); за наявності мідного покриття та утворення плівки

(б): 1 - сталь; 2 - чавун; 3 - окисні плівки; 4 - квазізріджені мідні та особливі плівки; 5 - напружені зони; 6 - мікронерівності; 7 - мастило.

Площа фактичного контакту поверхонь складається з безлічі малих дискретних майданчиків, розташованих на різних висотах плям дотику в місцях найбільш повного зближення поверхонь; При сполученні поверхонь з двох різних матеріалів площа фактичного контакту визначається фізико-механічними властивостями більш м'якого матеріалу та геометрією поверхні більш твердого матеріалу. Отже, для зниження коефіцієнта тертя важливим є радіус закруглення мікронерівностей більш твердого тіла. Чим він більше, тим з більшою безпекою дві сполучені третьові поверхні можуть працювати в режимі зовнішнього тертя. З іншого боку, можна так обробити поверхню більш м'якого матеріалу, що на його поверхню буде нанесений шар з м'якого матеріалу з великим радіусом закруглення нерівностей, а основа зміцниться.

При терті змащуваних поверхонь зі шарами міді, бронзи або латуні, можливо появи між ними тонкої квазізрідженої мідної плівки, що утворюється, як правило, в умовах вибіркового переносу; [32]. Тоді площа фактичного контакту може збільшитися в 10-100 разів, що призведе до різкого зниження інтенсивності зношування.

## 1.4. Ремонт агрегатів з відновленням розмірів зношених поверхонь електроіскровою обробкою.

Особливі властивості, якими володіє електроіскровий спосіб обробки металів (ЕІО), звернули на себе увагу дослідників, які займаються створенням технологій для відновлення деталей.

Перші дослідження на початку 50-х років XX століття щодо застосування ЕІО для відновлення розмірів зношених деталей сільгосптехніки провели А.Е. Алієв та А.В. Поляченко. [3, 75] За результатами цих робіт були вироблені рекомендації для зміцнення та відновлення деталей, які однак не отримали підтримки у ремонтників з наступних причин:

1. Товщина покриття, утвореного електроіскровим наплавленням не перевищувала 60 мкм.

2. Продуктивність наплавлення становила трохи більше 4- см<sup>2</sup>/хв, тобто була в 5 і більше разів менше, ніж при електродуговій наплавці та газотермічному нациленні.

3. Ремонтники не потребували зміцнення ріжучих інструментів, оскільки їхня вартість була низька, а якість висока.

Ситуація кардинально змінилася останніми роками; По-перше, найбільша товщина електроіскрових покриттів; наносяться сучасними джерелами живлення (рис. 1.4, 1.8, 1.9), придатних для відновлення зношених поверхонь деталей досягла 250 мкм і більше. По-друге, вузьким місцем ремонтного виробництва стали дорожче застосовуваного ріжучого та штампового інструментів, відсутність сучасних технологій та обладнання для відновлення деталей об'ємних гідроприводів, гідророзподільників та гідропідсилювачів, наєосів, плунжерних пар, турбогенераторів, пневмообладнання та деталей інших агрегатів зі зносами до 0,3 мм. Раніше це завдання вирішувалося, наприклад, гальванодифузійними та лазерними технологіями, які зараз практично не застосовуються. По суті, сучасному ремонтному виробництву виявилися потрібні універсальні технології та



# НУБІП України

засоби, як для зміцнення різальних інструментів, штампового оснащення та ливарних форм, так і для відновлення деталей з малими зносами.

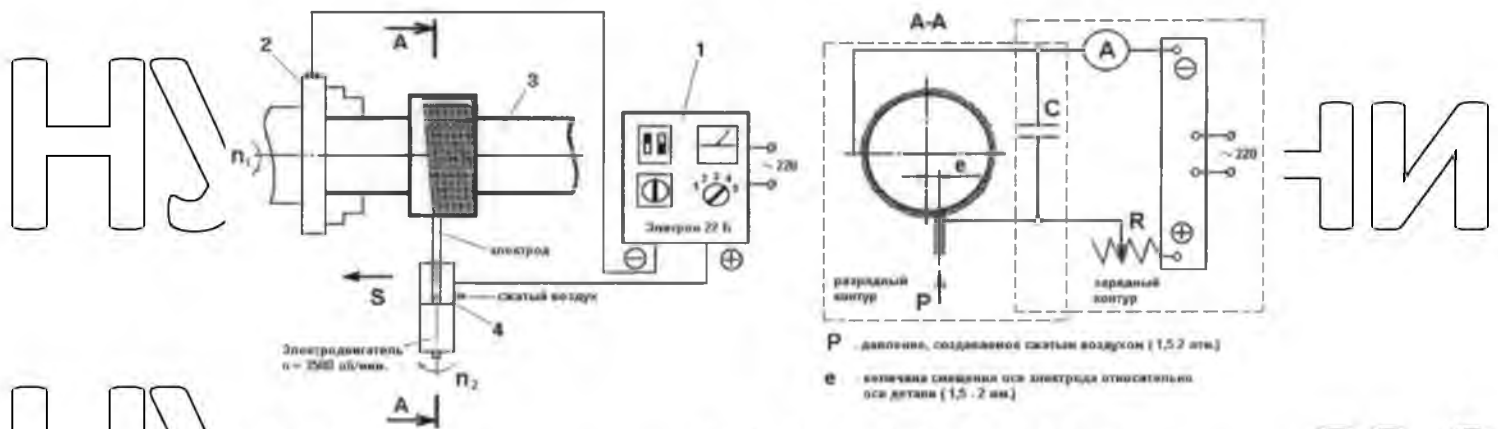


Рис. 1.8. Принципова схема роботи експериментальної установки «Елітрон-22Б» для відновлення зовнішніх циліндричних поверхонь у

механізованому режимі: 1 - генератор «Елітрон-22Б»; 2 - патрон токарно-гвинторізного верстата; 3 - деталь, що обробляється; 4 - обробна головка.

Освоєння ремонтними виробництвами електроіскрових технологій виявилось можливим шляхом впровадження певного ремонту агрегатів, механізації процесу наплавлення (рисунок 1.9), відмови, як правило, від подальшої механічної обробки покриттів, впровадження під «ключ» технологій та обладнання ЕІО з попередньою підготовкою операторів.

Для проведення електроіскрової обробки деталей всі деталі, що зношуються, умовно розбиваються на три класи: пари, що утворюють тертя, що утворюють нерухомі з'єднання, і - не утворюють таких. До третього класу деталей відносяться лапи культиваторів, ріжучі ножі, різці, лопатки газових турбін і т. д. Процес зносу таких деталей характерний дією робочого середовища на деталь і відсутністю впливу деталі на фізико-механічні властивості контр тіла. Відновлення та зміцнення зношених робочих поверхонь таких деталей вимагає створення на поверхні твердої зносостійкої «кірки» при в'язкій серцевині. У парах утворених першим і другим класами деталей, відбувається взаємний вплив матеріалу однієї деталі на матеріал

# НУБІП України

# НУБІП України

іншої/значною мірою відбивається на зносостійкості та фреттинг-корозійній стійкості пари в цілому.

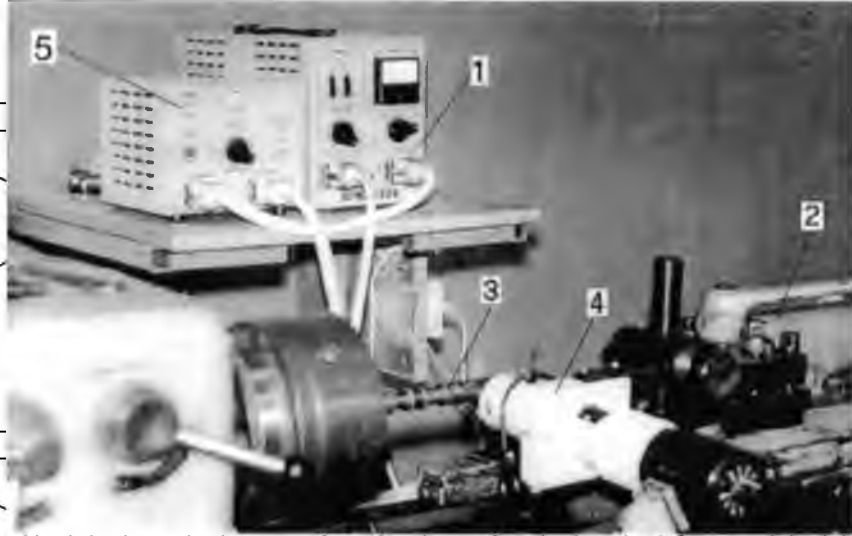


Рис. 1.9. Загальний вигляд механізованої установки для електроіскрової обробки: 1 - генератор «Елітрон-22Б»; 2 - токарно-гвинторізний верстат; 3 - оброблювана деталь (закріплюється в патроні верстата), 4 - обробна головка (кріпиться в різцетримачі верстата).

Відновлення та зміцнення розмірів, зношених робочих поверхонь таких деталей вимагає створення на поверхні як мінімум: двох-шарових покриттів з твердими та м'якими складовими; 3: з цим, ЕІО одного класу деталей принципово відрізняється від обробки іншого класу деталей.

Досвід відновлення зношених деталей, наприклад, гільз циліндрів [59], нижньої головки шатуна [52], корінних опор блоків циліндрів [38], бронзових опорних втулок розподільчих валів [76], провущин передньої балки автомобілів, стаканів кардана метровагона [93] та ін. показали принципову можливість ремонту агрегату з відновленням зношених деталей електроіскровою наплавкою [23, 31].

Проведені протягом п'яти років експлуатаційні спостереження за відремонтованими з використанням електроіскрових технологій гідророзподільниками з круглими і плоскими золотниками, пелюстковими насосами системи ГУР КамАЗ, плунжерними парами ГСТ-90, овальними

# НУБІП України

шестеренними насосами, блоками циліндрів показали, що ймовірність їх безвідмовної роботи і післяремонтний ресурс не нижче, ніж у нових агрегатів:

На підставі цих даних можна припустити, що ремонт турбокомпресорів з відновленням зношених поверхонь валу ротора, втулки підшипників, середнього корпусу електроіскровою обробкою забезпечує високий післяремонтний ресурс агрегату. Однак для розробки технології відновлення необхідно провести ретельні дослідження технологічних параметрів, процесу та фізико-механічних властивостей поверхонь оброблених методом: ЕІО стосовно відновлення даних деталей.

### **1.5. Мета та завдання дослідження.**

Аналіз надійності турбокомпресорів та методів відновлення параметрів зношених деталей дозволив визначити мету дослідження - підвищення середнього міжремонтного ресурсу турбокомпресорів ТКР-11Н-1 за рахунок створення зносостійких покриттів на зношених поверхнях деталей, методом ЕІО; що забезпечують зниження інтенсивності зношування відновлених партертя в 1,2...3 рази.

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

1. Встановити причини відмов турбокомпресорів, основні дефекти та зношування робочих поверхонь деталей.
2. Теоретично та експериментально обґрунтувати фактори, що впливають на працездатність та довговічність турбокомпресорів.
3. Здійснити розрахунок розмірних ланцюгів турбокомпресорів з метою виявлення спряжень, що лімітують його довговічність.
4. Обґрунтувати режими електроіскрової обробки та вибрати електроди для відновлення зношених деталей турбокомпресорів.
5. Провести експериментальні дослідження фізико-механічних та триботехнічних властивостей електроіскрових покриттів.
6. Розробити технологічний процес ремонту турбокомпресорів з відновленням параметрів зношених деталей, що забезпечить не менше 90%

НУБІП України  
післяремонтний ресурс. Провести його перевірку, оцінити економічну ефективність розробок.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# НУВБІП УКРАЇНИ

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТУРБОКОМПРЕСОРІВ

### 2.1. Середній ресурс турбокомпресорів термін служби.

Середній ресурс турбокомпресорів за термін служби, у першому наближенні, визначається за формулою [79].

$$\bar{T}_{\text{ТК}} = \bar{t}_{\text{др}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{кр}}} a_i \bar{t}_i - \sum_{i=1}^{n_{\text{кр}}} 0,5 \bar{t}_i [1 + V_i^2(t_{\text{имр}})] - \sum_{i=1}^{n_{\text{кр}}} \varepsilon_i \bar{t}_i,$$

де  $\bar{T}_{\text{ТК}}$ ,  $\bar{t}_{\text{др}}$ ,  $\bar{t}_{\text{имр}}$  - відповідно середні значення ресурсу турбокомпресора до списання, а також його до ремонту та міжремонтні ресурси;

$n_{\text{кр}}$  - число капітальних ремонтів турбокомпресора-за весь термін служби;

$a_i$  - ймовірність вибракування агрегату за  $i$ -й період експлуатації;

$V_i(t_{\text{имр}})$  - коефіцієнти варіації міжремонтних ресурсів турбокомпресора;

$\varepsilon$  - похибка оцінки.

Якщо припустити, що послідовні міжремонтні ресурси та коефіцієнти варіації турбокомпресорів рівні, формула (2.1)

перетворюється на такий вигляд [90, 65, 88]

$$\bar{T}_{\text{ТК}} = \bar{t}_{\text{др}} + n_{\text{кр}} \cdot \bar{t}_{\text{мр}} - 0,5 \cdot \bar{t}_{\text{мр}} [1 + V^2(\bar{t}_{\text{мр}})] - \varepsilon_i \bar{t}_i,$$

де  $\bar{t}_{\text{мр}}$  - середній міжремонтний ресурс турбокомпресора;  $n_{\text{кр}}$  - середнє кількість капітальних ремонтів протягом терміну служби;  $V(\bar{t}_{\text{мр}})$  - коефіцієнт варіації міжремонтних ресурсів.

Як випливає з формули (2.2), середній ресурс турбокомпресора до списання визначається середнім числом капітального ремонту, середнім міжремонтним ресурсом та коефіцієнтом варіації міжремонтного ресурсу.

При традиційному способі ремонту турбокомпресор, як правило, комплектується трьома категоріями деталей: що були в експлуатації,

відновленими та у складі запасних частин. Тому його надійність визначатиметься не лише якістю збирання та обкатки, а й кількісною співвідношенням цих деталей та їх якістю. При цьому суттєве значення має з

якою поверхнею взаємодіє відновлена поверхня - нової чи частково зношеної, оскільки від властивостей поверхні взаємно розташованих матеріалів залежить задиростійкість і зносостійкість спряження.

Вірогідність безвідмовної роботи деталей (спряжень), відмови яких призводять до вичерпання ресурсу відремонтованої-складальної одиниці, що мають відповідати вимогам [84].

$$P_{сб}^{MP}(t \geq T_M) \geq \prod_{i=1}^n \{1 - [k_{ci} F_{ci}(t) + k_{ri} F_{ri}(t) + k_{vi} F_{vi}(t)]\},$$

де  $P_{сб}^{MP}(t \geq T_M)$  - ймовірність безвідмовної роботи складальної одиниці до настання її граничного стану за нормативний ресурс  $T_M$  в міжремонтний період експлуатації;

$F_{ci}(t)$ ,  $F_{ri}(t)$ ,  $F_{vi}(t)$  - функції розподілу ресурсів нових, що були в експлуатації та відновлені деталей (спряжень) у міжремонтному періоді експлуатації складальної одиниці;

$k_{ci}$ ,  $k_{ri}$ ,  $k_{vi}$  - коефіцієнти змінності, придатності та відновлення;

$n$  - кількість ресурсовизначальних деталей (спряжень).

За даними [79 ,95] ресурси деталей, що послідовно замінюються в процесі експлуатації, до двох разів нижче, ніж ресурси тих же деталей, що встановлюються в новий виріб, а коефіцієнти варіації більше до 1,8 рази.

Отже, з об'єктивних умов експлуатації відремонтованих турбокомпресорів випливає, що  $P_{сб}^{MP}(t \geq T_M) \leq P_{сб}^{DR}(t \geq T_M)$  де  $P_{сб}^{DR}(t \geq T_M)$  - ймовірність безвідмовної роботи, нового турбокомпресора в рядових умовах експлуатації. У межі показники надійності відремонтованих виробів, навіть

укомплектованих новими деталями, буде нижчим, ніж у нових машин. Тому міжремонтний ресурс турбокомпресорів відремонтованих за традиційними

# НУБІП України

технологіями не перевищує значення, наприклад, для двигунів СМД-62, ЯМЗ-238НБ [49]:

$$\bar{t}_{\text{мр}} \leq 0,62 \bar{t}_{\text{др}}$$

Звичайно виникає питання, якими ж способами можна домогтися, щоб після ремонту турбокомпресора, його міжремонтний ресурс був не нижче 80 процентного ресурсу нового турбокомпресора або вище.

Для того, щоб дотримувалися умови  $R_{\text{сб}}^{\text{мр}}(t \geq T_{\text{м}}) < R_{\text{сб}}^{\text{др}}(t \geq T_{\text{м}})$ , по-перше, залишкові середні ресурси  $T_{\text{ост}}$  (РР повторно використовуваних і відновлених  $T_{\text{в}}$  деталей повинні бути більше середнього ресурсу  $T_{\text{н}}$  нового агрегату; по-друге, якщо є технології відновлення розмірів зношених деталей з ресурсами вище  $T_{\text{н}}$ , то доцільно нові деталі для ремонту не застосовувати.

Динаміка зношування робочої поверхні деталі (спряження) виражається у формі (див. рисунок 2.1)

$$I = \vartheta_{\text{пр}} t_{\text{пр}}^{\xi_{\text{пр}}} + \vartheta_{\text{с}} t_{\text{с}}^{\xi_{\text{с}}}$$

Де  $\vartheta_{\text{пр}}, \vartheta_{\text{с}}$  - відповідно швидкість зношування спряження (робочої поверхні) за час  $t = 1$  в період опрацювання і в рядових умовах експлуатації;  $\xi_{\text{пр}}, \xi_{\text{с}}$  - відповідно ступінь зміни зношування робочої поверхні (спряження) залежно від напрацювання.

Отже, за критерієм зносостійкості середній ресурс спряження (робочої поверхні) у доремонтному періоді експлуатації

$$\bar{T}_{\text{вд}} = \sqrt{\frac{\xi_{\text{с}}}{\vartheta_{\text{с}}} \frac{I_{\text{п}} - I_{\text{нач}}}{\vartheta_{\text{с}}}}$$

# НУБІП України

де  $I_{п}$  - допустимий граничний знос спряження (робочої поверхні);  $I_{нач}$  - сума середнього технологічного зазору (для робочої поверхні дорівнює нулю) та середнього зносу спряження в період обкатки.

Залишковий середній ресурс спряження (робочої поверхні), що була в експлуатації:

$$\bar{T}_{и,ост}(I_{мр}) = \bar{T}(I_{п}) - \bar{T}(\Delta I),$$

де  $I_{мр} = I_{п} - \Delta I$  - середній знос спряження (робочої поверхні) при поточному напрацюванні;  $\Delta I$  - середній знос у попередній фазі експлуатації.

Тоді середнє значення залишкового ресурсу спряження (робочої поверхні), за критерієм зносостійкості, визначається за формулою

$$\bar{T}_{и,ост}(I_{мр}) = \bar{T}(I_{п}) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\Delta I}{I_{п}} \right)^{\frac{1}{\xi_{мр}}} \right]$$

де  $\xi_{мр}$  - ступінь зміни зношування спряження (робочої поверхні) залежно від напрацювання. У турбокомпресорі (рисунок 1-1)-дев'ять спряжень, що піддаються зношуванню, одне з яких піддається фретинг-корозії, чотири торцевому тертя, одне тертю в режимі обертального руху; у мастильному середовищі, два зворотно-поступальному русі, одне кавітаційному, п'ять гідроабразивному зношуванню. У зв'язку з тим, що відомі значення доремонтного та міжремонтного середніх ресурсів турбокомпресорів [49], коефіцієнти повторюваності дефектів (див. таблицю 4.1), закони розподілу зношування робочих поверхонь (таблиця 4.4) після доремонтної експлуатації, оцінку ресурсу відновлених спряжень можна провести двома способами:

1) випробувати нові та відновлені спряження в режимі прискорених випробувань за ГОСТ 23.224-86 та оцінити параметри залежності зносу від напрацювання за формулою (2.4). Як впливає з формули (2.4)



# НУБІП УКРАЇНИ

найважливішою характеристикою, відновленої пари тертя є продуктивність, зокрема, величина зносу \* у період опрацювання. Якщо прироблюваність

пари тертя низька, то в період обкатки виробу можливі задири, заїдання і велике зношування, що призводить до зниження ресурсу спряження і, отже, відремонтованого вузла.

# НУБІП УКРАЇНИ

Інтенсивність зношування пари тертя в період припрацювання

$$I_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{л,пр}}}{L}$$

# НУБІП УКРАЇНИ

де  $I_{\text{л,пр}}$  - знос спряження (робочої поверхні) в період опрацювання, м;

$L$  - довжина тертя, пройдена парою тертя до першого зниження сили тертя, що відповідає зносу  $I_{\text{л,пр}}$  і мінімального коефіцієнта тертя неприробленого з'єднання  $f_{\text{min,н}}$  (рисунок 4.20).

# НУБІП УКРАЇНИ

У процесі лабораторно-стендових випробувань фіксується максимальна несуча здатність припрацьованого спряження  $P_{\text{мп}}$ , МПа, при якому різко зростає сила тертя; оптимальна несуча здатність з'єднання  $P_{\text{оп}}$ , МПа, при якому коефіцієнт тертя припрацьованого спряження  $f_{\text{min,п}}$  має мінімальне значення та інтенсивність зношування при навантаженні  $P_{\text{оп}}$

# НУБІП УКРАЇНИ

$$I(P_{\text{оп}}) = \frac{I_c}{L}$$

де  $I_c$  - знос сполучення при навантаженні  $P_{\text{оп}}$  і  $f_{\text{min,п}}$  за шлях тертя

# НУБІП УКРАЇНИ

$L$ .  
При порівняльних випробуваннях нових і відновлених, різними електродами спряжень оптимальне навантаження може істотно відрізнитися.

Тому для підвищення достовірності оцінки триботехнічної працездатності спряження інтенсивність зношування необхідно нормувати за формулою:

# НУБІП УКРАЇНИ

# НУБІП України

$$\Phi = \frac{1(3_{оп})}{P_{оп}}$$

де  $\Phi$  - фактор зносу.

Якщо триботехнічна працездатність відновлених спряжень агрегату відповідають умовам:  $P_{в,мп} > P_{н,мп}$ ;  $P_{в,оп} > P_{н,оп}$ ;  $f_{в,мп,п} < f_{н,мп,п}$ ;  $T_{в,пр} < T_{н,пр}$ ;  $\Phi_{в} < \Phi_{н}$ , то такі технології забезпечують не менше 100-процентний ресурс після ремонту.

2) проводяться експлуатаційні випробування відновлених спряжень у складі нового або відремонтованого турбокомпресора та за результатами цензурованих випробувань оцінюються ресурс спряження та його відносне значення.

$$\Psi > \frac{\bar{T}_в}{\bar{T}_н}$$

де  $\bar{T}_в$ ,  $\bar{T}_н$  - відповідно середній ресурс відновленого та нового спряжень.

Якщо середина поля допуску нового та відновленого спряження відрізняються, їх динаміка зношування підпорядковуються залежностям (рисунк 2.1).

$$I_{нп} = \Delta_n + \vartheta_{н,пр} t_{пр}^{\xi_{н,пр}} + \vartheta_{н,с} t_{с}^{\xi_{н,с}}$$
$$I_{вп} = \Delta_в + \vartheta_{в,пр} t_{в,пр}^{\xi_{в,пр}} + \vartheta_{в,с} t_{в,с}^{\xi_{в,с}}$$

де  $\Delta_n$  і  $\Delta_в$  - координати середини полів допусків нової і відновленої деталі (спряження),  $\vartheta_{л,пр}$ ,  $\vartheta_{л,с}$  - відповідно швидкість зношування сполучення (робочої поверхні) за час  $t=1$  в період приробітку 1 в етандових умовах випробувань;  $\xi_{л,пр}$ ,  $\xi_{л,с}$  - відповідно ступінь зміни зношування робочої поверхні (спряження) залежно від напрацювання.

# НУБІП України

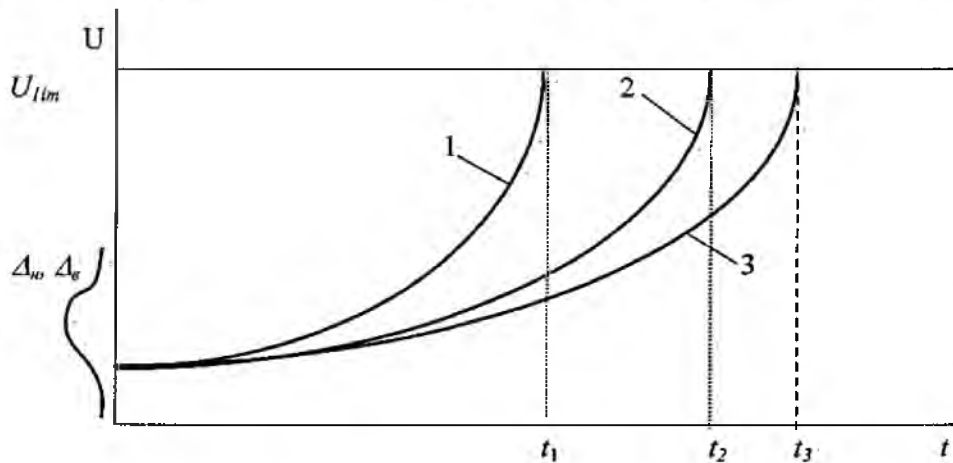


Рис. 2.1. Динаміка зношування нових та відновлених деталей (спряжень): 1 - нові спряження (деталі); 2 - відновлені спряження (для досягнення 100% ресурсу спряження після ремонту); 3 - відновлені спряження (для досягнення ресурсу двигуна після ремонту).

За умови  $\Delta_n \geq \Delta_v$  і  $\vartheta_{n,pr} \geq \vartheta_{v,pr}$ ,  $\vartheta_{n,c} \geq \vartheta_{v,c}$ ,  $\xi_{n,pr} \geq \xi_{v,pr}$ ,  $\xi_{n,c} \geq \xi_{v,c}$  ресурс відновленого спряження більше ресурсу нового спряження на величину  $\Delta t = t_2 - t_1$  (рисунок 2.1), але у відремонтованій складальній одиниці ресурс сполучення буде дорівнює ресурсу нового спряження в доремонтному періоді експлуатації.

## 2.2. Навантаження, що діють на підшипники турбокомпресора

Найбільш слабкою ланкою, що визначає ресурс турбокомпресорів, є пара тертя "вал ротора - підшипник".

Для оцінки якості відновлення параметрів зношених поверхонь: стендовими триботехнічними випробуваннями необхідно встановити, що діють на цей вузол навантаження  $P_{me}$ , оскільки в науково-технічній літературі немає однозначної відповіді з цього питання.

Для відновленої пари тертя має дотримуватися умова:

$P_{v,мп} > P_{n,мп} \geq K_d P_{me}$ , де  $P_{v,мп}$ ,  $P_{n,мп}$  - відповідно несуча здатність відновленого і нового сполучення.  $K_d$  - коефіцієнт динамічності навантаження, що залежить, в основному, від ступеня зносу пар тертя. Отже, другим

# НУБІП України

завданням є встановлення ступеня впливу зростання зазорів у парах тертя на значення коефіцієнта динамічності.

У більшості сучасних автотракторних турбокомпресорів дизелів підшипниковий вузол має два антивібраційні (вібростійких) підшипники ковзання, робоча поверхня яких має спеціальну форму або підшипники ковзання на пружній основі та виконаний за схемою, представленій на рисунку 2.2.

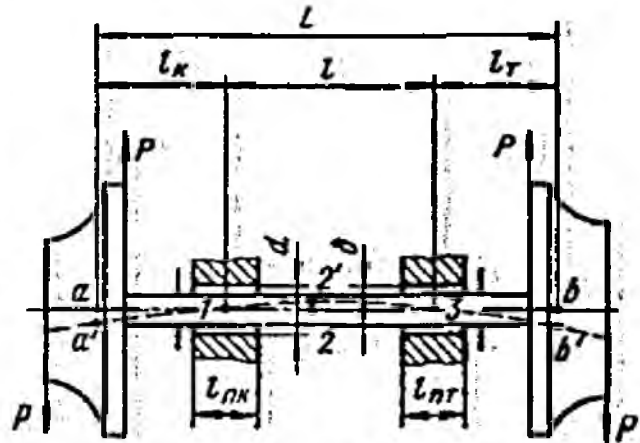


Рис. 2.2. Схема ротора турбокомпресора

Найпростіший метод підвищення вібростійкості підшипників ковзання

та збільшення їхньої несучої здатності - встановлення в звичайний циліндричний підшипник плаваючої втулки [42].

Величина і напрямок радіальної сили, що діє на підшипники від тиску відпрацьованих газів двигуна, залежать від конструкції напрямного апарату турбіни. Якщо газі підводяться одночасно до діаметрально протилежним лопаткам турбінного колеса, то підшипники практично не мають навантаження; Якщо ж підведення газів здійснюється на лопатки лише однієї сторони колеса, то на підшипники діятиме сила

$$P_{\text{ср}} = \frac{M_{\text{тк}}}{r_{\text{ср}}}$$

де  $M_{\text{тк}}$  - момент, що передається ротором;

$r_{\text{ср}}$  - середній радіус лопаток колеса турбіни.

# НУБІП України

Сили від неврівноважених мас ротора залежать переважно від точності його балансування. Відцентрова сила з боку компресора та з сторони турбіни

$$P_{ц} = \frac{D}{g} \omega^2 \cdot 10^{-3},$$

де  $D$  - статичний дисбаланс деталей ротора з боку компресора чи турбіни;  
 $\omega$  - кутова швидкість ротора.

Аналіз зовнішніх сил, що діють на підшипники, показує, що для оцінки навантаження на підшипниковий вузол можна враховувати тільки відцентрові сили, оскільки інші сили становлять 2-3% від суми відцентрових сил і їх можна знехтувати [1].

Як було зазначено вал ротора у підшипнику внаслідок сил, що виникають від дисбалансу, описує деяку замкнуту траєкторію, яка близька до кругової (відбувається обертання лінії центрів).

Обертання лінії центрів (прецесія осі ротора) призводить до появи відцентрової сили  $P_m$  від маси ротора, що припадає на розглянуту опору

$$P_m = m\rho (k_{\omega}/\omega)^2,$$

де  $m$  - маса деталей, що припадає на розглянуту опору;

$\rho$  - радіус прецесії осі ротора у площині зосередженої маси колеса;

$k_{\omega} = \omega_p/\omega$  - відношення кутової швидкості прецесії до кутової швидкості обертання ротора.

Сила  $P_m$  залежить від геометричних параметрів підшипників та ротора, маси робочих коліс, величини дисбалансу та в'язкості олії.

### **2.3. Способи підвищення довговічності підшипникового вузла турбокомпресорів з моноштулкою, що не обертається.**

У підшипниковому вузлі ковзання турбокомпресора гідродинамічна дія олії проявляється при найменшій швидкості ковзання. Як зазначалося в 1-й главі одним із найбільш несприятливих експлуатаційних режимів роботи двигуна, що впливають на надійність вузла підшипників ТКР, є режим пуску, особливо - при негативних температур. У цих умовах значно затримується надходження олії до підшипників. Стабільний тиск мастильного матеріалу забезпечується

# НУБІП УКРАЇНИ

не раніше ніж через 30 секунд після запуску двигуна. Недостатня кількість олії призводить до зміни гідродинамічного режиму роботи підшипника, тобто виникає, режим граничного чи напівсухого тертя.

# НУБІП УКРАЇНИ

Для зменшення зношування в режимах пуск-зупинка при недостатній подачі мастильного матеріалу до підшипників ковзання поверхні тертя повинні мати нерегулярну шорсткість з «олійними кишеньками», що забезпечують елементарні гідродинамічні клини (рис. 2.5).

У турбокомпресорах: застосовуються підшипники ковзання з плаваючими втулками, режими роботи яких досліджено у роботі [1].

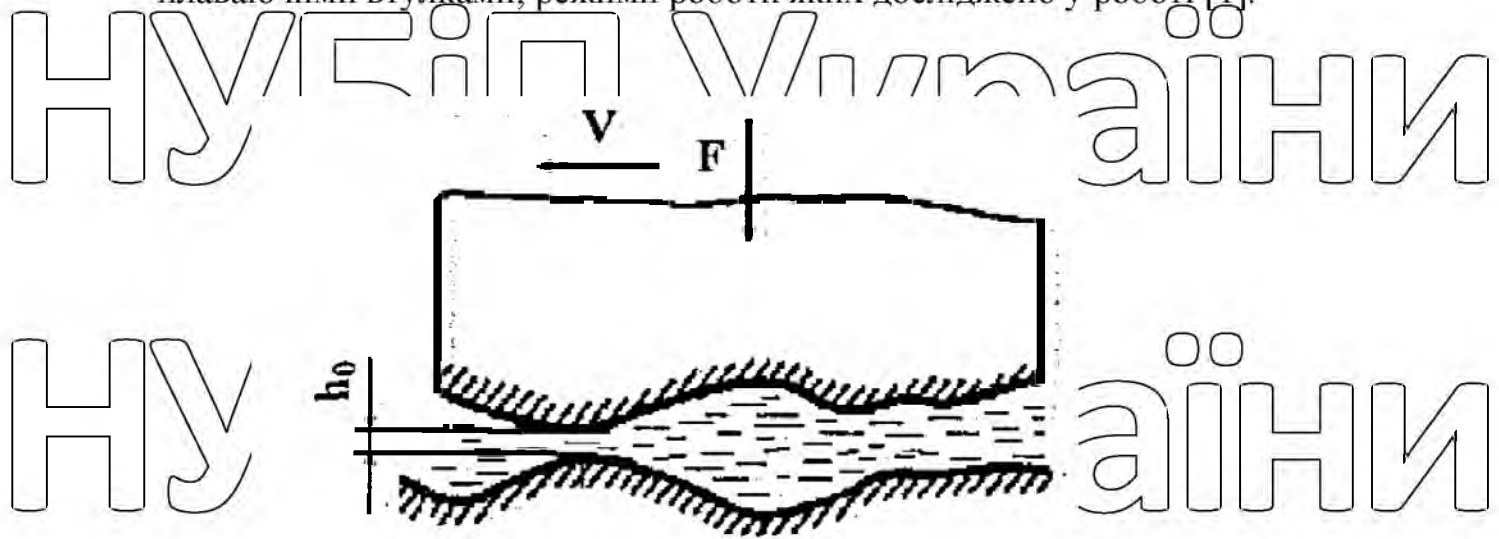


Рис. 2.5. Схема елементарного гідродинамічного клина, утвореного нерівностями поверхонь тертя.

# НУБІП УКРАЇНИ

На рисунку 2.6 показано закономірності зміни відносної величини  $A$ , що дорівнює відношенню виміряного значення переміщення траєкторії кінця валу ротора, при його обертанні з частотою 60000 об/хв, до максимально можливого переміщення через перекос у підшипниках, зібраних без мастильного матеріалу.

# НУБІП УКРАЇНИ

# НУБІП УКРАЇНИ



$$\bar{A} = A_d / A_{\Delta} \cdot 0,7$$

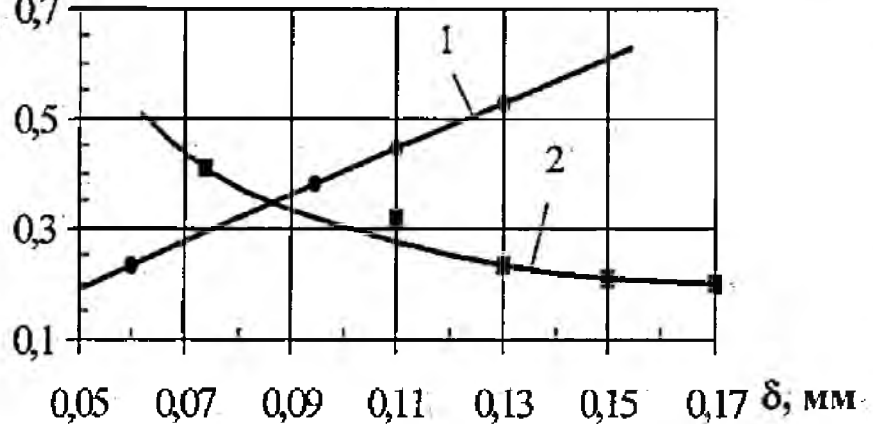


Рис. 2.6. Зміна відносної траєкторії кінця ротора у вузлі підшипників з моноштулкою, що не обертається, залежно від зазорів:  $A_d$  - дійсне переміщення кінця валу ротора;  $A_{\Delta}$  - максимально можливе переміщення кінця валу ротора; 1 - внутрішнього; 2 - зовнішнього.

З графіків (рисунок 2.6) видно, що із зменшенням зазору у парі тертя «вал ротора - підшипник» від 0,15 мм до 0,05 мм величина  $\bar{A}$  знижується майже лінійно до 0,2. Зі збільшенням зовнішнього зазору підшипникового вузла в послідовності «підшипник - середній корпус» з 0,06 мм до 0,15 мм величина  $\bar{A}$  зменшується від 0,51 до 0,2.

Отже, у вузлі підшипників з плаваючою не обертається моноштулкою в міру зменшення зазору в парі тертя «вал ротора-підшипник» (внутрішній зазор) та зростання зазору «підшипник-корпус» (зовнішній зазор) стабілізується обертання ротора (відбувається зближення положення осі валу з віссю підшипника).

Так як у підшипникового вузла турбокомпресора ТКР-11Н-1 зовнішній зазор становить 0,060-0,098 мм при середньому значенні 0,079 мм, то при цих значеннях зазору величина  $\bar{A}$  змінюється від 0,51 до 0,3 при середньому значенні 0,4 (рис. 2.6). Технологічний зазор у парі тертя «вал ротора-підшипник» становить 0,07 - 0,09 мкм [92], отже, вихідне значення  $\bar{A} = 0,275 - 0,35$ .

Середня інтенсивність зношування пари тертя «вал ротора-підшипник» в 3,78; рази вище інтенсивності зношування пари тертя, «підшипник-корпус».

У процесі експлуатації внутрішній зазор змінюється; в середньому від 0,08 мм до 0,35 мм, отже, поточне переміщення кінця валу ротора; може наблизитися, а потім перевищить максимальне значення перекосу ротора в підшипниках, зібраних без мастильного матеріалу. Тоді втулка втрачає здатність до переміщення в радіальному напрямку, та ротор притискається до втулки із силою; що призводить до деформації внутрішньої поверхні та інтенсивному її зношування.

При досягненні переміщення кінця валу ротора максимальною величиною зазору, між зовнішнім діаметром масловідбивача та внутрішнім діаметром диска ущільнення, відбувається торкання масловідбивача про щиток диска ущільнення компресора, [4].

С цього моменту різко зростає величина дисбалансу ротора, і ця пара тертя зазнає аварійного зношування. Отже, в процесі експлуатації турбокомпресора, гранично допустиме переміщення кінця валу ротора не повинно перевищувати гранично допустиму величину зазору в парі масловідбивач - щиток диска компресора ущільнення. Гранично допустима величина зазору в парі масловідбивач - щиток диска ущільнення компресора визначається розрахунком розмірної ланцюга турбокомпресора (рис. 2.7, 2.8).

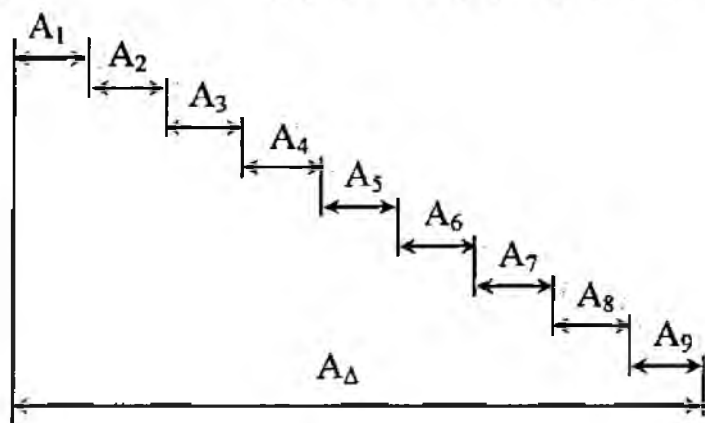


Рис. 2.7. Схема розмірного ланцюга підшипникового вузла турбокомпресора ТКР11Н-1



# НУБІП України

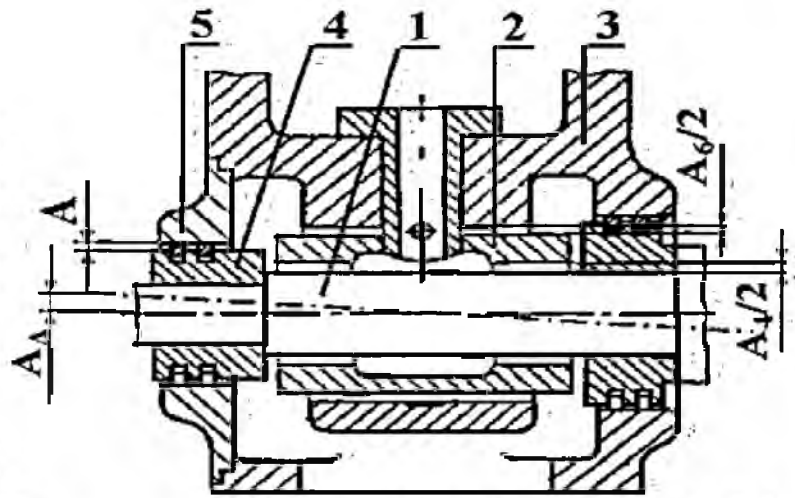


Рис. 2.8. Підшипниковий вузол турбокомпресора ТКР1 Н-1.

1 - вал ротора; 2 - підшипник; 3 - корпус середній; 4 - масловідбивач; 5 - диск ущільнення компресора.

Складовими ланками розмірного ланцюга є:  $A_1$  - зміщення осі зовнішньої поверхні масловідбивача щодо осі отвору масловідбивача;  $A_2$  - зміщення осі отвору масловідбивача щодо осі шийки валу (биття);  $A_3$  - зміщення осі посадкової поверхні валу ротора під масловідбивач щодо осі шийок валу під підшипник;  $A_4$  - зміщення осі шийок валу під підшипник щодо осі отвору підшипника (за рахунок зазору);  $A_5$  - усунення осі зовнішньої поверхні підшипника щодо осі внутрішньої поверхні;  $A_6$  - зміщення осі зовнішньої поверхні підшипника щодо осі отвору середнього корпусу під підшипник (за рахунок зазору);  $A_7$  - зміщення осі посадкового від отвору середнього корпусу під диск ущільнення компресора щодо м-осі отвору під підшипник;  $A_8$  - усунення осі посадкової поверхні диска ущільнення компресора щодо осі отвору середнього корпусу під диск ущільнення (за рахунок биття канавки під гумове ущільнення);  $A_9$  - зміщення осі отвору диска ущільнення під кільця ущільнювача щодо осі посадкової поверхні диска ущільнення (биття).

# НУБІП України

Складові ланки розмірної ланцюга  $A_4, A_6$  є зазорами, а всі інші ланки являють собою векторні помилки (похибки з готування). Векторні помилки поділяються на обертові та нерухомі. До помилок векторів, що обертаються, відносяться складові ланки  $A_1, A_3$ .

# НУБІП України

Зважаючи на те, що нас цікавить найбільше значення розбіжності осей при одному обороті валу, результуюче значення  $\gamma$  помилки векторів, що обертаються, буде сумуватися з іншими помилками як скалярна величина [43]:

Тоді рівняння розмірного ланцюга має вигляд:

# НУБІП України

$$A_A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9$$

Передавальне число ланок:

$$\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = \xi_6 = \xi_7 = \xi_8 = \xi_9 = 1$$

# НУБІП України

Дані для розрахунку технологічного розмірного ланцюга наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Ланка розмірний ланцюга	Розміри та допустимі відхилення, мм	Розміри та нові допустимі відхилення, мм	Коефіцієнт відносною асиметрії, $\alpha$	Коефіцієнт відносною розсіювання $K^2$
1	2	3	4	5
$A_1$	0,030		-	0,6
$A_2$	0,0235		-	0,6
$A_3$	0,025		-	0,6
$A_4$	$18^{+0,018}$		0	1,1
	$18^{+0,070}_{-0,080}$		0,05	1,2
$A_5$	0,02		-	0,6

# НУБІП України

# НУБІП України

Продовження таблиці 2.1.

1	2	3	4	5
$A_6$	$\frac{32^{+0,027}}{32_{-0,080}^{-0,060}}$	$\frac{32^{+0,039}}{32_{-0,110}^{-0,090}}$	$\frac{0}{0,05}$	$\frac{1,1}{1,2}$
$A_7$	0,06			0,6
$A_8$	0,1		-	0,6
$A_9$	0,1		-	0,6
$A_{\Delta}$	$\frac{29,6^{+0,045}}{32_{-0,033}}$		0	$K_{\Sigma} = 1$

# НУБІП України

При ймовірнісному методі розрахунку технологічного розмірного ланцюга допуск замикаючої ланки визначається залежністю:

$$T_{\Sigma} = \frac{1}{K_{\Sigma}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \xi_i^2 K_i^2 T_i^2},$$

# НУБІП України

де  $K_{\Sigma}$ ,  $K_i$  - Коефіцієнти відносного розсіювання значень відповідно замикаючого та  $i$ -го складового ланок розмірного ланцюга;

$T_i$  - допуск  $i$ -го ланки розмірного ланцюга. [56]

# НУБІП України

Чисельні значення коефіцієнтів асиметрії та відносного розсіювання визначаються залежно від виду остаточної обробки досліджуваної поверхні за табличними даними [43].

Оскільки складовими ланками розмірного ланцюга є відхилення осей, то при розрахунках зручніше використовувати величину половини поля допуску

# НУБІП України

$$\delta_i = \frac{1}{2} T_i$$

Половина поля розсіювання розміру замикаючої ланки (у квадраті) під дією зазорів [43]

# НУБІП України

# НУБІП УКРАЇНИ

$$K_{\Sigma}^2(z)\delta_{\Sigma}^2(z) = \frac{1}{4} \sum_i A_i^2 \cdot (K_{ai}^2 \delta_{ai}^2 + K_{bi}^2 \delta_{bi}^2) = 0,175 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$$

координата середини поля розсіювання розміру ланки, що замикає, під дією зазорів

# НУБІП УКРАЇНИ

$$\Delta_{\Sigma} = \frac{1}{2} \sum_i [(\Delta_{ai} + \alpha_{ai} \delta_{ai}) - (\Delta_{bi} + \alpha_{bi} \delta_{bi})] = 0,0834 \text{ мм}$$

Половина поля розсіювання розміру замикаючої ланки (у квадраті) під дією векторних помилок:

# НУБІП УКРАЇНИ

$$K_{\Sigma}^2 \delta_{\Sigma}^2 = \sum_i \xi_i^2 K_i^2 \delta_i^2 = 0,0153 \text{ мм}^2$$

# НУБІП УКРАЇНИ

де  $\delta_i$  - половина біття.

Половина поля розсіювання розміру ланки, що замикає, під дією всіх видів помилок:

# НУБІП УКРАЇНИ

$$\delta_{\Sigma} = \frac{1}{K_{\Sigma}} \sqrt{\sum_i K_{\Sigma(i)}^2 \delta_{\Sigma(i)}^2} = 0,124 \text{ мм},$$

де  $l$  - всі види помилок входять у цю розмірну ланцюг.

Тоді верхнє граничне відхилення замикаючої ланки складе:

# НУБІП УКРАЇНИ

$$B_o = A_{\Delta max} = \Delta_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = 0,2074 \text{ мм},$$

що менше технологічного зазору в поєднанні «уштыльнення» рівного 0,3 мм.

Проведемо розрахунок динамічного розмірного ланцюга. Дані до розрахунку наведено у таблиці 2.2.

# НУБІП УКРАЇНИ

# НУБІП України

Таблиця 2.2

Ланка розмірної ланцюги	Розміри та допустимі відхилення, мм	Інтервал значень, мкм	Стандартне відхилення $\sigma_x$	Математичне очікування $\mu_x$ , мкм	$\alpha$	$K^2$
1	2	3	4	5	6	7
A <sub>1</sub>	0,030		-			0,6
A <sub>2</sub>	0,0235		-			0,6
A <sub>3</sub>	0,025		-			0,6
A <sub>4</sub>	$18^{+0,018}$	$2 - 70$	$\frac{15,65}{93,1}$	$\frac{24,62}{150}$	$\frac{-0,167}{-0,11}$	$\frac{1,1}{1,2}$
	$18^{-0,070}$ $18^{-0,080}$	$4 - 382$				
A <sub>5</sub>	0,02		-			0,6
A <sub>6</sub>	$32^{+0,027}$	$2 - 62$	$\frac{14,8}{13,33}$	$\frac{20}{26}$	$\frac{-0,2}{-0,162}$	$\frac{0,548}{0,317}$
	$32^{-0,060}$ $32^{-0,080}$	$2 - 73$				
A <sub>7</sub>	0,06					0,6
A <sub>8</sub>	0,1		-			0,6
A <sub>9</sub>	0,1		-			0,6
A <sub>Δ</sub>	$29,6^{+0,045}$					K <sub>Σ</sub> = 1
	$29^{-0,033}$					

Поле розсіювання  $\omega_\Sigma$  замикаючої ланки динамічного розмірного ланцюга, що є наслідком зміни розмірів деталей під дією експлуатаційних факторів:

$$\omega_\Sigma = \frac{1}{K_{\omega\Sigma}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \xi_{\omega i}^2 K_{\omega i}^2 \omega_i^2} = 0,141 \text{ мм}$$

Координата середини поля розсіювання замикаючої ланки з урахуванням зазорів визначиться залежностями:

# НУБІП України

$$\Delta_{\omega\Sigma} = \sum \xi \Delta_{\omega i} = 0,171 \text{ мм};$$

$$S_{\omega\Sigma} = A_{\Delta\partial} = \Delta_{\omega\Sigma} + 0,5 \omega_{\Sigma} = 0,171 + 0,5 \cdot 0,142 = 0,313 \text{ мм},$$

# НУБІП України

тобто більше технологічного зазору в поєднанні масловідбивач - диск "ущільнення" що дорівнює 0,3 мм.

Таким чином, максимальне зсув осі вада більше ніж технологічний зазор між масловідбивачем і щитком диска ущільнення компресора. Зменшити чисельне значення замикаючої ланки динамічного розмірного ланцюга

# НУБІП України

можливо більшою стабілізацією ротора щодо осі обертання, збільшивши зовнішній і зменшивши внутрішній зазор підшипникового вузла (див. рисунок 2.6).

Як було сказано, у підшипникового вузла турбокомпресора ТКР-11Н-1 зовнішній зазор становить 0,060-0,098 мм при середньому значенні 0,079 мм,

# НУБІП України

то при цих значеннях зазору величина  $A$  змінюється від 0,51 до 0,3, при середньому значенні 0,4 (рис. 2.6).

Технологічний зазор у парі тертя "ротор - втулка" становить 0,07 - 0,09 мм, отже, вихідне значення  $\bar{A} = 0,275 - 0,35$ . Визначимо величину, до якої можна збільшити зовнішній та зменшити внутрішній зазор підшипникового

# НУБІП України

вузла. Розрахунки, здійснені аналогічно, попереднім показали, щоб верхнє граничне відхилення замикаючої ланки дорівнювало

$$B_{\partial} \sim A_{\Delta\max} = 0,225 \text{ мм},$$

тобто щоб гарантований зазор у поєднанні «масловідбивач - диск ущільнення компресора» був не менше 0,075 мм, необхідно зменшити

# НУБІП України

внутрішній зазор до 0,07 мм, щоб  $A$  було менше 0,275, і розширити зовнішній зазор в межах 0,090-0,149 мм. Тоді траєкторія кінця ротора  $A$  становитиме 0,35-0,2 (рисунок 2.6), що у 1,46-1,5 рази менше, ніж за номінальних значеннях зовнішнього зазору 0,060-0,098 мм. Тоді нові розміри і граничні відхилення,

що допускаються, складуть:

# НУБІП України

$$\text{зовнішньої поверхні підшипника } \varnothing 32 \begin{matrix} -0,090 \\ -0,110 \end{matrix}$$

# НУБІП України

- отвори середнього корпусу під підшипник  $\varnothing 32^{+0,039}$

Враховуючи, що величина % - відносний ексцентриситет пропорційна

величині відносного переміщення кінця ротора  $\bar{A}$ , тоді сили, що діють на підшипники ротора (див. формулу 2.19) зменшаться також у 1,46-1,5 рази за всіх інших рівних умов.

# НУБІП України

Таким чином, для підвищення довговічності турбокомпресора потрібно:

1. Забезпечити виникнення гідродинамічних мікроклінів у моменти пуску та зупинки двигуна шляхом створення нерегулярної шорсткості у вигляді «олійних кишень».

# НУБІП України

2. Створити умови, щоб максимальна амплітуда траєкторії динамічного переміщення кінця ротора  $A_d$  була менше мінімального зазору замикаючої ланки  $A$  шляхом збільшення зазору сполучення «підшипник-корпус середній» з 0,060 - 0,098 мм до 0,090 - 0,149 мм та зменшення зазору в парі тертя "ротор - втулка" від 0,07 - 0,09 мм до 0,07 - 0,08 мм.

# НУБІП України

3. Підвищити зносостійкість сполучень «вал ротора - підшипник» і «підшипника - середній корпус» не менш ніж утричі.

## 2.4. Оптимізація технологічних режимів електроіскрової обробки.

# НУБІП України

Оптимізація технологій відновлення параметрів зношених робочих поверхонь деталей, перш за все, проводиться для підвищення зносостійкості «слабкого спряження» турбокомпресора «вал ротора - підшипник» з тим, щоб підвищити його зносостійкість не менш ніж утричі. Особливість ЕІО полягає:

# НУБІП України

у тому, що для кожного режиму обробки, матеріалів електрода і деталі, складу газового середовища, в якому відбувається обробка, існує гранична товщина наплавленого шару. Однією з причин є зміна вихідного хімічного складу матеріалу електрода під час перенесення його на поверхню деталі і зміна хімічного складу поверхневого шару деталі; наприклад збагачення наплавленого шару киснем та азотом повітря.

# НУБІП України

# НУБІП України

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

# НУБІП України

Друга причина, що обмежує граничну товщину покриття, пов'язана з глибокими змінами, що виникають в поверхневих шарах оброблюваної деталі: поява і накопичення дефектів кристалічних решіток, що перешкоджають дифузії; виникнення напруги; поява «пухких» поверхневих шарів, які під дією переносяться від електрода матеріалу руйнуються і: відносяться з поверхні деталі. При цьому незалежно від часу обробки електрод руйнується практично за лінійним законом.

# НУБІП України

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

# НУБІП України

Вал ротора турбокомпресора виготовлений із сталі 40Х, а підшипник із бронзи БрОС 10-10. Попередньо вибір наплавочного електрода здійснюється за критеріями [103]:

$$\gamma_n = \frac{m_k}{m_a} \ll 1,$$

# НУБІП України

де  $m_a$  - ерозія анода;  
 $m_k$  - ерозія катода, та за критерієм відносною ерозійної здатності матеріалів:

# НУБІП України

$$D_m = \frac{c_k \rho_c \lambda_k (T_{пл}^k - T_{хл}^k)^2 \cdot \Psi_D}{c_a \rho_a \lambda_a (T_{пл}^a - T_{хл}^a)^2 \cdot \Psi_E} \gg 1,$$

де  $c_k, c_a$  - відповідно, питома теплоємність катода і анода;  
 $\rho_k, \rho_a$  - відповідно, щільність матеріалів катода та анода;  
 $\lambda_k, \lambda_a$  - відповідно, коефіцієнт теплопровідності матеріалів катода та анода;

# НУБІП України



# НУБІП України

$T_{пл}^k, T_{пл}^a$  - відповідно, температура плавлення матеріалів катода та анода;  
 $T_{хл}^k, T_{хл}^a$  - відповідно, температура холодноломкості матеріалів катода та

анода;

$\Psi$  - характеристична температура деталі та електрода, що визначається за формулою Ліндемана:

$$\Psi_{д,э} = 137 \frac{T_{д,э}^2 P_{д,э}^3}{M^3}$$

де  $M$  - молекулярна вага матеріалів деталі і електрода, і з урахуванням накопиченого досвіду відновлення деталей, виготовлених з різних бронз і сталей.

Виходячи з цих передумов, для проведення наплавлення на вал ротора турбокомпресора були відібрані матеріали з різним вмістом вуглецю: сталь 85, сталь 11Х15М6 і сталь Т3Х25Н18.

Для відновлення зношених поверхонь бронзового підшипника було обрано матеріали наступних марок: мідь М1, бронзи БрОС 10-10, БрОЦС 5-5-5, БрКМц3-І, БрАЖМц10-3-1,5, БрАЖ9-4, БрАМц9-2.

Після попереднього вибору матеріалу електродів проводиться оптимізація режимів наплавлення в ручному та в механізованому режимах.

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

## РОЗДІЛ 3. МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1. Програма досліджень.

У процесі роботи було проведено низку експериментальних досліджень, що з кількох етапів. На першому етапі проведено аналіз причин відмов турбокомпресорів, що дозволило виявити ресурсовизначальні деталі, які необхідно відновлювати та сформулювати вимоги до їх довговічності. За критерії властивостей покриттів прийняті їхня мікротвердість і зносостійкість. Розглянуто існуючі способи відновлення зношених деталей турбокомпресорів, виявлено їх переваги та недоліки. У результаті прийнято, що з відновлення зношених поверхонь деталей найкращим способом є електроіскрова обробка.

На другому етапі були проведені мікрометражні дослідження для оцінки параметрів закону розподілу зношування деталей, і визначені величини шару металопокриття, необхідні для відновлення зношених деталей турбокомпресорів.

На третьому етапі проводився вибір наплавних матеріалів та раціональних режимів електроіскрової наплавки, досліджувалися склад та властивості покриттів. На цьому етапі виконані металографічні дослідження та проведені випробування зразків на зносостійкість, в результаті яких встановлені залежності зміни фізико-механічних властивостей матеріалів параметрів способу відновлення.

Четвертий етап був присвячений розробці нового технологічного процесу ремонту турбокомпресора відновленням зношених деталей електроіскровою обробкою. За розробленою технологією відремонтовано партію турбокомпресорів та проводять експлуатаційні випробування.

# НУБІП України

На останньому етапі здійснено розрахунок техніко-економічної ефективності запропонованої технології за результатами її апробації на підприємствах виробників сільгосппродукції.

## 3.2. Методика проведення мікрометражних досліджень.

Мікрометражним дослідженням зазнавали деталі турбокомпресорів, які надійшли на ремонт в УНПЦ ІМЕ МДУ ім. Н.П. Огарьова, а також Ярославське РТП. Вимірювалися всі деталі, що зношуються в процесі експлуатації.

Число об'єктів виміру при плані  $N$ , у разі довірчої ймовірності  $\alpha = 0,95$ , відносної помилки  $\varepsilon = 0,15$  і очікуваному коефіцієнту варіації  $\nu = 0,5$  визначається рішенням рівняння [78]:

$$\chi_{1-q}^2 \frac{2N}{\chi_{1-q}^2(2N)} = (\varepsilon + 1),$$

де  $\chi_{1-q}^2$  - квантиль  $\chi^2$  - розподілу з числом ступенів свободи  $2N$ , що відповідає ймовірності  $1-q$ ;

$\varepsilon = \frac{R - \hat{R}}{\hat{R}}$  - верхня відносна помилка оцінки показника вимірювання  $\hat{R}$ .  
Рішення рівняння (3.1) табульовані у роботі [102]. За таблицею 6 знаходимо, що мінімальна кількість турбокомпресорів, що підлягають дефектуванню  $N = 40$ .

Для підвищення достовірності результатів мікрометражних досліджень були обстежені деталі 68 турбокомпресорів.

Після розбирання та миття деталі ТКР просушувалися. При вимірі деталі не знесоблювалися. Результати вимірювань заносили в мікрометражні картки (Додаток 1).

Як засоби вимірювання використовувалися такі інструменти:

# НУБІП України

НУБІП України  
- для валу ротора, маслорозподільника, фіксатора - важільний мікрометр  
МРП 0-25 ГОСТ П098-75 з точністю 0,001 мм;

- для втулки підшипника - індикаторний нутромір 10-18 ГОСТ 9244-75 з  
точністю індикаторної головки 0,002 мм, важільний мікрометр МРП 25-50  
ГОСТ П098-75 з точністю 0,001 мм, мм;

НУБІП України  
- для отворів середнього корпусу - індикаторний нутромір 18-50 ГОСТ  
9244-75 з точністю індикаторної головки 0,002 мм;

Вимірювання проводилися згідно зі схемами вимірювань (рисунки 3.1-  
3.6.).

НУБІП України  
Діаметр кожної шийки під підшипник ротора турбокомпресора  
вимірювався у двох взаємно перпендикулярних площинах, визначення  
овальності і в чотирьох перерізах, визначення конусності. Також  
вимірювалася ширина канавок під кільця ущільнювачів (рисунок 3.1.).

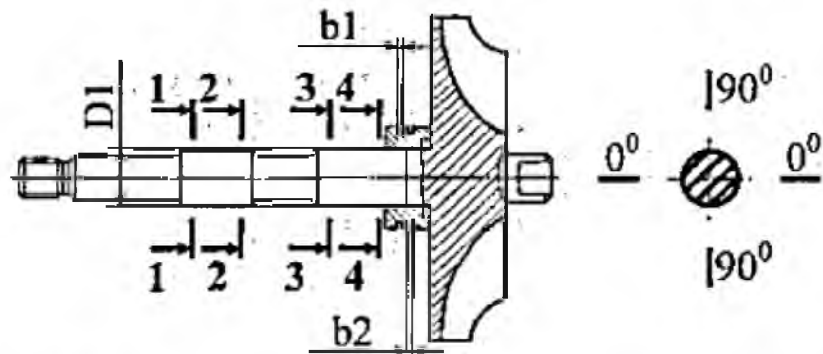


Рис. 3.1 Схема вимірювання ротора турбокомпресора

Втулки підшипників вимірювалися у двох взаємно перпендикулярних  
площинах, визначення овальності і чотирьох перерізах, визначення  
конусності. Також вимірювалися довжина втулки, діаметр отвору під фіксатор  
у двох взаємно перпендикулярних площинах (рисунок 3.2).

НУБІП України

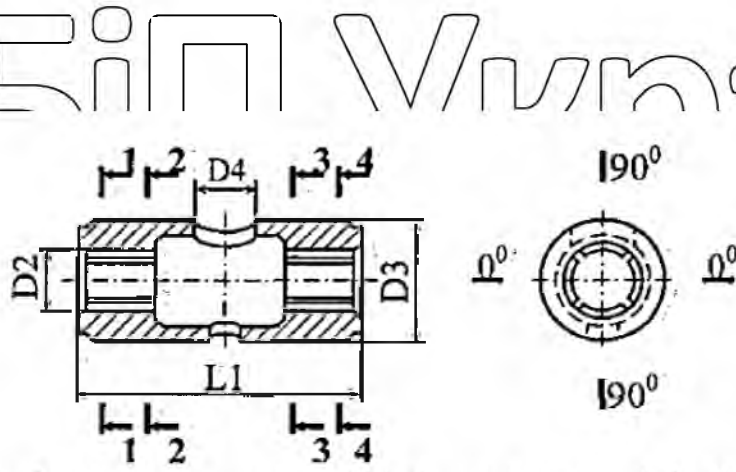


Рис. 3.2. Схема вимірювання втулки підшипників.

У масловідбивача вимірювалися висота у двох перпендикулярних перерізах і ширина канавки під кільця ущільнювачів (рисунок 3.3).

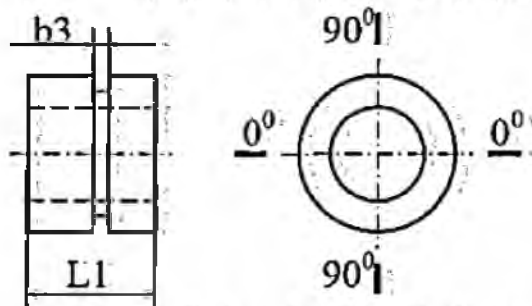


Рисунок 3.3. Схема вимірювання масловідбивача

У середньому корпусі вимірювалися: посадковий діаметр під втулку підшипників у двох перпендикулярних перерізах, для визначення овальності та у чотирьох перерізах, для визначення конусності; діаметр отвору під кільця ущільнювача (рисунок 3.4).

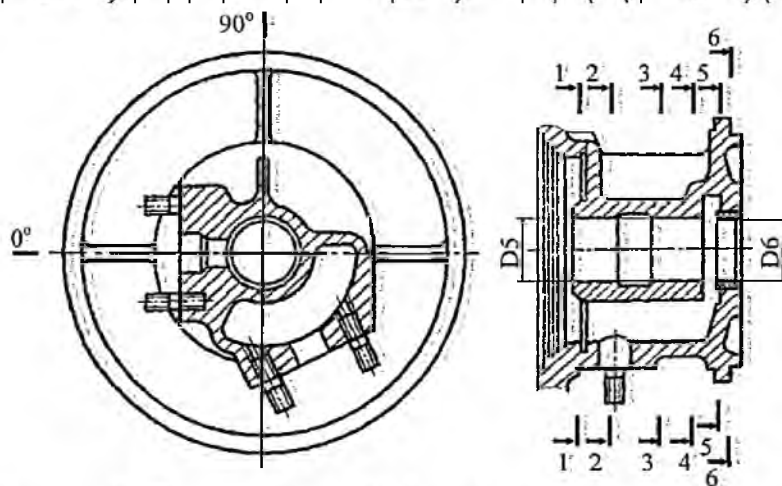


Рис. 3.4. Схема вимірювання середнього корпусу.

# НУБІП України

У диска ущільнення компресора вимірювався діаметр отвору під кільця ущільнювача (рисунок 3.5.).

У фіксатора вимірювався діаметр під підшипник (рисунок 3.6).

# НУБІП України

У зв'язку з відсутністю відомостей про початкові розміри деталей вивчався вихід дійсного розміру за межі поля допуску (надалі називатимемо його зносом)  $U$ , для поверхонь, що охоплюються і охоплюють відповідно:

$$U = D - D_{max}^{don},$$

$$U = d_{min}^{don} - D,$$

# НУБІП України

де  $D, d$  - дійсний розмір деталі поверхні, що охоплює і охоплюється відповідно, мм;

$D_{max}^{don}, d_{min}^{don}$  - максимально (для поверхні, що охоплюється) або мінімально (для поверхні, що охоплює) допустимий розмір деталі.

НУ

НУ

НУ

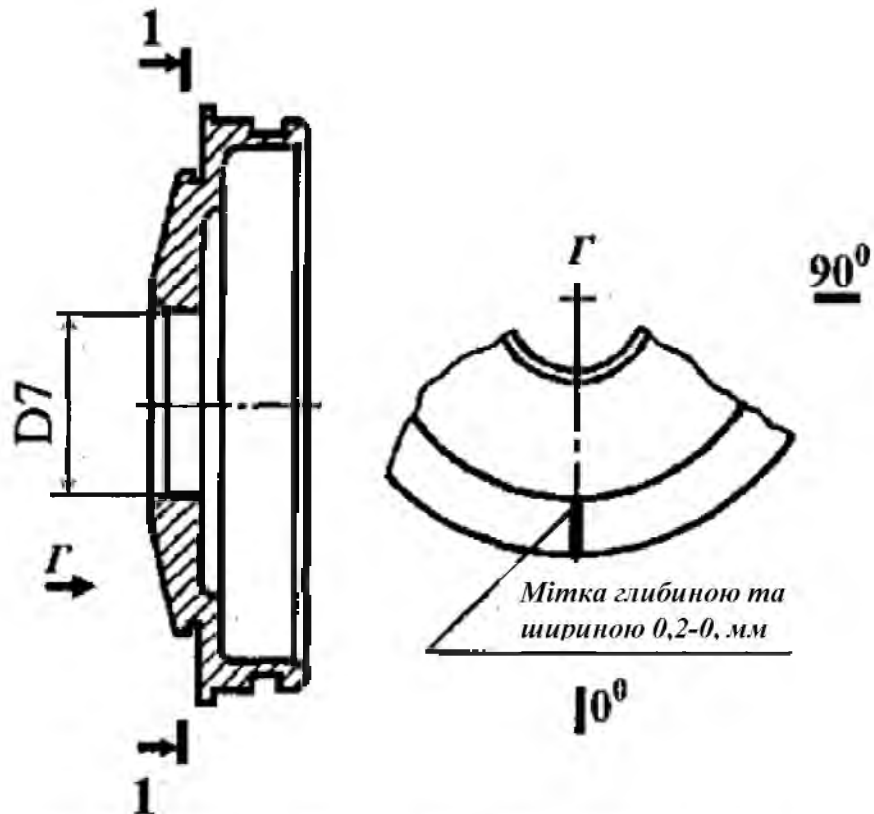


Рис. 3.5. Схема вимірювання диска ущільнення компресора.

# НУБІП України

НУБІП України

НУ

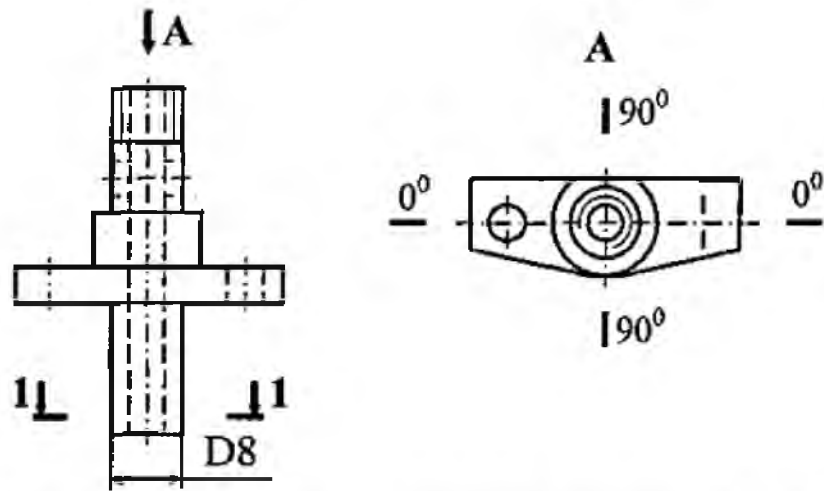


Рис. 3.6. Схема вимірювання фіксатора.

Результати первинної обробки заносилися до відповідних карт (Додавок 1).

Статистична обробка даних мікрометражних досліджень включала:

побудова статистичного ряду та визначення основних характеристик (математичного очікування  $m_x$ , середньоквадратичного відхилення  $\sigma_x$ , коефіцієнта варіації  $v$  та  $n$ ) емпіричного розподілу розмірів (зносів) поверхонь деталей;

Статистична обробка мікрометражних даних проводилася на ПК з використанням прикладних пакетів статистичних програм Statgraf, Stat і Excel.

За окремими результатами виміру обчислювали математичне очікування значення:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

де  $m_x$  - математичне очікування;

$x_i$  - значення одиничного показника виміру;

$n$  - кількість показників.

НУБІП України



НУБІП України  
Середньоквадратичне відхилення  $\sigma_x$  і коефіцієнт варіації  $v$   
обчислювали за такими залежностями:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n-1}}, \quad v = \frac{\sigma_x}{m_x}.$$

НУБІП України  
Параметри теоретичних законів розподілу визначали аналітичним способом. Параметр  $b$  закону розподілу Вейбулла визначали за табличними даними [5], а параметр обчислювався за формулою:

НУБІП України  
 $\alpha = \frac{\sigma_x}{c_b}$   
де  $c_b$  - табельовані коефіцієнти, що визначаються за таблицями [5].

Результати мікрометражних досліджень та обробки експериментальних даних представлені у параграфі 4.1.

НУБІП України  
**3.3. Методика вибору технологічних режимів електроіскрової обробки.**

Вибір матеріалу електрода та технологічних режимів ЕІО проводиться для кожного конкретного матеріалу, розмірів та профілю поверхні відновлюваної деталі та виду обробки (ручна або механізована). Для проведення експерименту з нанесення поверхневого шару методом ЕІО виготовлялися малі модельні зразки, що імітують зношуються поверхні. Зразки виготовлялися з тих самих матеріалів, що й відповідні деталі ТКР, піддавалися такій же термічній обробці (для зразків, що імітують вал ротора-загартування СВЧ), а також вибракованих деталей ТКР. Діаметр і шорсткість зразків відповідали діаметрам і шорсткості деталей, що підлягають відновленню.

Були виготовлені такі зразки:

НУБІП України



1) Кільця зі сталі 40X (валу ротора) зовнішнім діаметром 18 мм, внутрішнім діаметром 9 мм, шириною 5 мм. Шорсткість поверхні зразка становила  $R_a = 0,32$  мкм;

2) Кільця із бронзи БрОС-10-10 (втулки підшипників) зовнішнім діаметром 32 мм, внутрішнім діаметром 18 мм, шириною 6 мм. Шорсткість поверхні становила  $R_a = 0,32$  мкм.

3) Плоскі зразки розмірами 30x20x 10 мм із сталі 40X, що вийшли з ладу та спресовані, з валу ротора втулки ущільнень, випресовані із середнього корпусу втулки, масловідбивачі.

Перед нанесенням покриття поверхня зразка знежирювалася ацетоном. Потім зразки зважувалися та вимірювалися. Вихідні дані заносилися в таблицю протоколу експерименту.

Експеримент з ЕІО проводився в механізованому та ручному режимі. У механізованому режимі експериментальної установки, представленої малюнку 1.9.

При нанесенні шару на зовнішню поверхню (зразки 1 і 2) кільця встановлювалися на оправці, закріпленої в трикулачковому патроні токарно-гвинторізного верстата.

Для ЕІО в ручному режимі використовувалася модернізована установка «Елітрон-2БМ» (рисунок 1.4) з високочастотним блоком, що дозволяє регулювати частоту вібрації електрода в діапазоні, 150-350 Гц, тривалість затримки імпульсу 0,2-3,5 мс і амплітуда 1-10 одиниць.

При нанесенні шару на плоскі та внутрішні поверхні зразки закріплювалися у лещатах, встановлених на столі.

У процесі проведення експерименту також використовувалося таке обладнання та інструменти:

- ваги аналітичні типу ВЛР-200 (точність вимірювання до 0,00005 г) з різновагами;

- важільний мікрометр МРП 0-25 ГОСТ 11098-75 з точністю 0,001 м;

# НУБІП України

-важільний мікрометр МРП 25-50 ГОСТ 11098-75 з точністю 0,001 мм.,  
індикаторний нутромір 10-18 ГОСТ 9244-75 з точністю індикаторної головки  
0,002 мм.;

- Мікроскоп МИМ-8.

# НУБІП України

В ході випробувань на установці для механізованої ЕЮ (рисунок 1.9) частоту обертання зразка фіксували на рівні 11,2 об/хв, а частоту обертання електрода-інструменту - на рівні 3500 об/хв. Варіюють подачею електрода на зразок оборот  $S$  від ОД 1 до 1,17 мм/об. Обробка проводилася на 5 режимі установки «Елітрон-22Б» (робочий струм  $I = 3,8$  А, енергія, розряду  $W = 1,66$  Дж відповідно, при напрузі  $U = 96$ , див. табл. 3-1);

# НУБІП України

При ручному режимі ЕЮ (рис. 1.4) для всіх електродів обробка проводилася на 5 енергетичному режимі установки (енергія імпульсу 1,66 Дж).

# НУБІП України

Частоту вібрації електрода змінювали в межах 150-350 Гц з кроком 50 Гц, тривалість затримки електрода в діапазоні 0,2-4 мс, амплітуду вибирали мінімальну, коли виключається «залипання» електрода.

# НУБІП України

Площа нанесення 1см. Нанесення робили по 1 хвилині, після кожної хвилини фіксувалися: загальна товщина нанесеного шару, зміна маси зразка та електрода, суцільність шару. Обробка тривала до отримання максимальної товщини покриття, і фіксувався початок її зменшення.

# НУБІП України

Зміна товщини шару визначали за допомогою індикаторної головки з межами виміру 1мм та ціною розподілу 1мкм, маси зразків та електродів на терезах ВЛР-200, суцільність покриття мікроскопом МИМ-8 з 24,5-кратним збільшенням об'єктива. Все вимірювання проводили з триразовою повторюваністю.

# НУБІП України

Після кожного доевіду зразки знежирювали ацетоном, зважували та вимірювали. За допомогою мікроскопа МИМ-8 оцінювали якісні показники поверхневого шару: суцільність, раковини, непровари.

# НУБІП України

Первинна обробка результатів експерименту полягала у визначенні товщини шару металопокриття та суцільності покриття зразків. Усі досліди проводилися з триразовою повторюваністю. Результати усереднювалися.

# НУБІП України

НУБІП України

Результати досліджень щодо вибору раціональних технологічних режимів електроіскрової обробки та аналіз експериментальних залежностей, що описують процес, представлені в параграфі 4.2.

### 3.4. Методика балансування роторів турбокомпресорів.

НУБІП України

Траєкторія переміщення кінця валу складається з високочастотних коливань, що відповідають частоті обертання валу, і низькочастотних, що є результатом вібрацій у внутрішньому та зовнішньому шарі мастильного матеріалу вузла підшипників [86, 91]. Неврівноважені маси ротора ТКР при обертанні викликають відцентрові сили  $P_{ц}$  і  $M_{ц}$ , які створюють основне навантаження на опори і є причиною вимушених коливань валу. Отже, одним з важливих технологічних факторів, що забезпечують надійність турбокомпресорів, є динамічна врівноваженість роторів, яка може бути оцінена величиною дисбалансу.

НУБІП України

У турбокомпресорів ж, що вийшли з ремонту, величина дисбалансу роторів часто перевищує допустиму величину. Так, наприклад, дисбаланс роторів турбокомпресорів СМД ТКР11Н-1, СМД ТКР11Ц-2, що йдуть на складання на Смілянському ремонтному заводі Черкаської області досягає 0,27 г-см при допустимому 1 0,2 г-см [11]. Основними причинами неякісного балансування роторів є: недостатня кваліфікація робітників, несправність балансувального обладнання, а також порушення технологічного процесу балансування роторів.

Щоб зменшити відцентрові сили та моменти до допустимої величини, у наших дослідженнях ротор піддається динамічному балансуванню для визначення величини та положення неуврівноважених мас та зменшення їх зняття металу з робочих коліс. Балансування ротора турбокомпресора проводилося на балансувальному верстаті ДБ-50А (рисунок 3.11). На рисунку 3.12 дано принципову схему балансувального верстата.

НУБІП України

НУБІП України

НУ

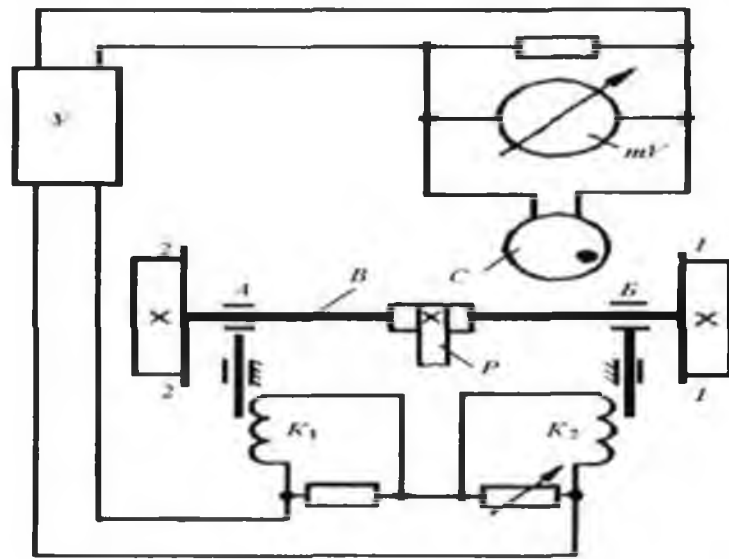


НИ

НУБІП України

Рис.3.11. Балансувальний верстат ДБ-50А.

НУ



НИ

НУ

НИ

Рис. 3.12. Принципова схема балансувального верстата.

НУБІП України

Балансовану деталь встановлюють нерухомі опори А і Б, які жорстко пов'язані за допомогою стрижнів з котушками  $K_1$  і  $K_2$ , що знаходяться в полі постійних магнітів. Обертання до деталі передається від електродвигуна за допомогою ремінної передачі Р. Площини 1-1 і 2-2 є площинами врівноважування (для балансування конструктором задаються дві площини перпендикулярні осі обертання - площини врівноважування). Кільця опор,

НУБІП України

викликані невірнорозваженістю мас деталі, що обертається, передається через стрижні на котушки  $K_1$  і  $K_2$  і через підсилювач  $У$  фіксується лічильником дисбалансу  $mV$ . Місце розташування дисбалансу визначається стробоскопом

$C$ . При кожному обороті лампа стробоскопа спалахує один раз і висвітлює одну із цифр, нанесених по колу деталі. Висвітлена стробоскопом цифра на деталі, що знаходиться в горизонтальній площині, проходить через вісь обертання та відповідає кутовому розташуванню дисбалансу в тій чи іншій площині врівноваження.

Динамічний баланс ротора виконується при частоті обертання 2500 об/хв так, щоб залишковий дисбаланс ротора турбокомпресора ТКР-1Н-1 не перевищував 0,2 г·см [92]. Щоб уникнути виникнення відцентрових сил і моментів, що діють на ротор, динамічне балансування проводиться у два етапи. Спочатку балансується окремо вал ротора в площині колеса турбіни, а потім ротор у зборі в площині колеса компресора [86,92].

Найбільш трудомістка операція - балансування колеса турбіни з валом. Вал ротора при балансуванні спирається на дві опори, а колесо турбіни розміщується консольно. Таке розташування деталі ускладнює процес балансування. При вибраній схемі балансування з консольним розташуванням колеса турбіни можуть зустрітися чотири характерні випадки дисбалансу (рисунк 3.13).

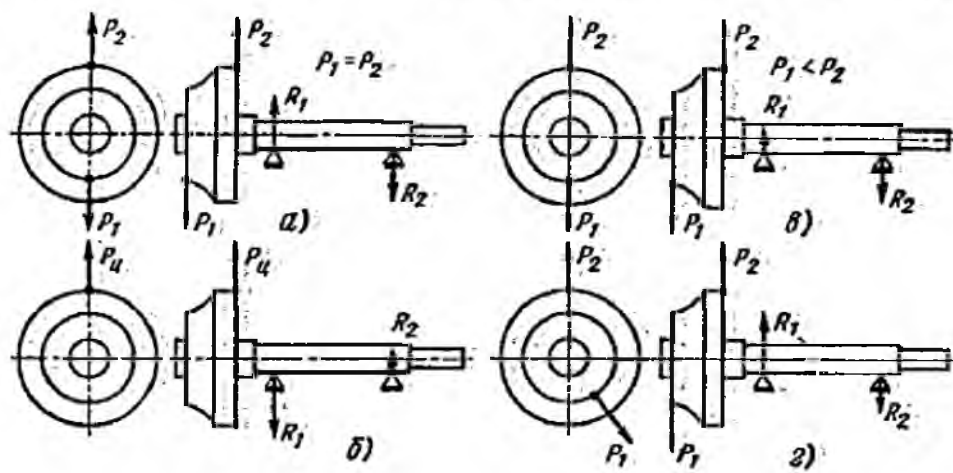


Рис. 3.13. Схеми балансування валу ротора з колесом турбіни.

1. Колесо турбіни статично врівноважене, тобто пара сил  $P_1$  і  $P_2$ , що лежать в одній площині та протилежні у напрямку, проходить через вісь ротора (рисунок 3.13, а). На опорах балансувального верстата виникають реакції  $R_1$  і  $R_2$ , рівні за величиною та протилежні за напрямом. Ці реакції лежать у тій самій площині, як і сили  $P_1$  і  $P_2$ . Для усунення дисбалансу навішуванням вантажів у площинах врівноваження створюють момент, протилежний за знаком моменту сил від  $P_1$  і  $P_2$ . Навішувати вантажі (пластилін), рівні за величиною, потрібно в площинах врівноваження на однаковій відстані від осі обертання та в діаметрально протилежних напрямках. Поступово масу вантажів збільшують, зводячи  $R_1 = R_2$  до мінімуму. Після цього знімають відповідну кількість металу колеса в місцях діаметрально протилежних навішенню вантажу.

2. Колесо турбіни має невірноважену масу, внаслідок чого при обертанні ротора з'являється відцентрова сила  $P_c$  (рисунок 3.13 б). При балансуванні вона проявляється у виникненні на обох опорах реакцій  $R_1$  і  $R_2$ , спрямованих у протилежні сторони та різних за величиною, причому  $R_1$  – реакція на ближній до колеса опорі значно більша за  $R_2$  – реакція на дальній опорі. Усувається дисбаланс навішуванням вантажу в такий спосіб, ніж створити моменту відцентрових сил. Це досягається переміщенням одного і того ж вантажу з однієї площини врівноважування в іншу в секторі, що вказується стробоскопом для найближчої опорі до колеса. При цьому необхідно звернути увагу на те, щоб реакції  $R_1$  та  $R_2$  залишалися в тій же площині, де були на початку і щоб величина реакції  $R_2$  не збільшувалася. На виникнення моменту від наявної невірноваженої маси та маси, що вводиться для її компенсації, вказує збільшення  $R_2$  при зменшенні  $R_1$ .

3. Невірноважені маси колеса такі, що з'являються відцентрова сила  $P_c$  і момент  $M_c$ .

В окремому випадку сила  $P_c$  і момент  $M_c$  діють в одній і тій же площині, що проходить через вісь валу (рисунок 3.13 в) тоді реакції опор  $R_1$  і  $R_2$  не рівні одна одній але лежать в одній площині. Дізнатися, де розташована

# НУБІП УКРАЇНИ

неврівноважена маса, що викликає силу  $P_c$  (ближче до торцевої площини диска або площині, що проходить через вихідні кромки лопаток), можна зіставляючи абсолютні величини реакцій опор  $R_1$  і  $R_2$ . Якщо  $R_1 < R_2$ , то  $P_2 > P_1$ ,

# НУБІП УКРАЇНИ

причому реакція  $R_1$  може бути спрямована в протилежний або в той самий бік, що і  $R_2$ . Якщо ж  $R_1 > R_2$ , то сила

$P_1 > P_2$ . У цьому випадку реакції  $R_1$  та  $R_2$  завжди спрямовані в протилежні сторони. Дисбаланс усувається в такий спосіб. Після визначення

# НУБІП УКРАЇНИ

площини дії сил  $P_1$  і  $P_2$  навішують вантажі в тій площині врівноваження, де відцентрова сила більша, домагаючись, щоб реакції опор  $R_1$  і  $R_2$  дорівнювали за модулем і протилежні у напрямку тобто. наводять дисбаланс до випадку 1.

# НУБІП УКРАЇНИ

4. Загальний випадок усунення дисбалансу показаний малюнку 3.13, г, тобто. коли сила  $P_c$  і момент  $M_c$  лежать у різних площинах. Прийmemo, що до

# НУБІП УКРАЇНИ

колена турбіни прикладені: сила  $P_1$  у площині врівноважування, що проходить через вихідні кромки лопаток і сила  $P_2$  у площині врівноваження, що проходить через диск диска торця колеса. Розкладемо велику силу на дві складові, з яких одна буде спрямована протилежно до меншої сили і дорівнює їй за величиною, тобто. утворює пару сил, а друга спрямована під кутом до першої. Таким чином, отримаємо пару сил та невірноважену силу.

# НУБІП УКРАЇНИ

Технологія балансування в основному така сама, як і в попередньому прикладі. Спочатку врівноважують відцентрову силу, а потім момент. Якщо сила та момент лежать у різних площинах, що проходять через вісь валу, то реакції  $R_1 \neq R_2$  і лежать у різних площинах. Реакція  $R_2$  визначає площину дії пари а  $R_1$  - площину дії сили  $P_c$ . У якій із площин врівноважування навішувати вантажі, що компенсують невірноважену масу, що викликає силу  $P_c$ , можна

# НУБІП УКРАЇНИ

дізнатися, зіставляючи величини реакцій. Якщо  $R_1 < R_2$ , то сила  $P_c$  знаходиться ближче до торцевої площини диска колеса. Якщо  $R_1 > R_2$ , то сила  $P_c$  ближче до площини вихідних кромки лопаток. Сила  $P_c$  вважається врівноваженою, якщо  $R_1 = R_2$ .

# НУБІП УКРАЇНИ

Після балансування валу ротора з колесом турбіни роблять складання ротора. На другому етапі балансується ротор у зборі (з масломдбивачем,

НУБІП УКРАЇНИ

колесом компресора та гайкою) у площині колеса компресора за методикою описаною вище. Перед збиранням інші деталі ротора (масловідбивач, гайка)

щоб уникнути порушення балансування ретельно перевіряються щодо биття зовнішніх і торцевих поверхонь.

### 3.5. Методика стендових випробувань турбокомпресорів, зібраних із серійних та відновлених деталей.

Після виготовлення або ремонту всі турбокомпресори піддаються обкатці та випробуванню на контрольному режимі, на підставі результатів якого дається висновок про якість виготовлення або ремонту.

Обкатка та випробування турбокомпресорів проводиться на спеціалізовані стенди. Ці стенди використовуються для випробування турбокомпресорів на надійність. Класифікацію стендів для випробування турбокомпресорів та їх елементів на надійність показано на малюнку 3.14. Для випробування турбокомпресорів застосовуються стенди створені на основі дизельних двигунів (моторні) та безмоторні.

Моторний стенд являє собою дизельний двигун з встановленим турбокомпресором, що випробовується; у своїй режимі випробування ТКР задаються роботою дизеля.

В даний час стенди на основі дизельних двигунів для випробувань на надійність застосовуються порівняно рідко у зв'язку з тим, що дизель є складним агрегатом, режим роботи якого залежить від технічного стану багатьох складових (паливна апаратура, циліндро-поршнева група, система змащення, система охолодження та ін). Залежно від технічного стану двигуна змінюється режим роботи турбокомпресорів, що випробовуються, що позначається на достовірності одержуваних результатів випробувань. Крім того, такий стенд не дозволяє змінювати всі експлуатаційні фактори незалежно один від одного у всьому діапазоні експлуатаційних значень.

Ярославським моторним заводом, НАМИ, Харківським тракторним заводом, НАТИ, Дергачівським заводом турбокомпресорів, Цілинною філією

НУБІП УКРАЇНИ



НУБІП України

ДЕРЖСНІТІ, зарубіжними дослідниками та іншими підприємствами та науковими організаціями створені різні безмоторні стендові установки для обкатки, контрольних випробувань та випробувань на надійність як

НУБІП України

турбокомпресорів елементів, позбавлених недоліків, властивих моторним стендам. Як робоче тіло для приводу турбокомпресора в таких стендах використовується холодне повітря або гарячий газ [1,9,52].

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# НУБІП України

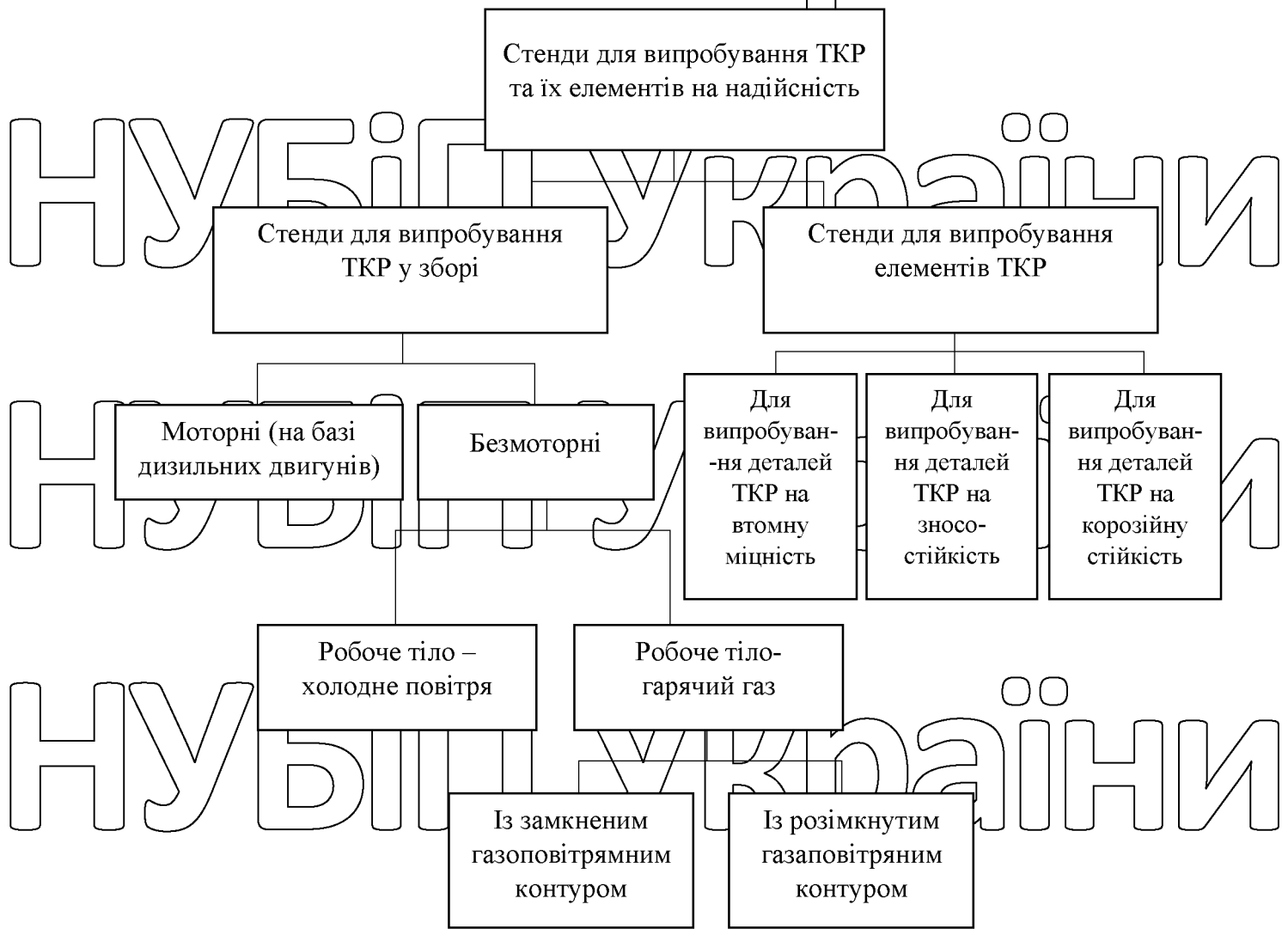


Рис. 3.14. Класифікація стендів для випробування турбокомпресорів та їх елементів на надійність.

Стенди, у яких як робоче тіло використовується холодне повітря, застосовуються, в основному для дослідницьких випробувань турбокомпресорів. Вони не можуть бути використані для випробування турбокомпресора на довговічність, оскільки не дозволяють забезпечити температурний режим роботи ТКР на експлуатаційному рівні. Крім того, при роботі турбіни на холодному повітрі змінюється характер сил, що діють на турбіну і підшипниковий вузол порівняно з роботою турбіни на гарячому газі. Особлі зусилля, що діють на підшипниковий вузол, при роботі на холодному

# НУБІП України

повітрі досягають значних величин, момент тертя на торцевих поверхнях значно перевищує допустимі значення, що може призвести до зміни характеру зношування ресурсних деталей.

# НУБІП України

Стенди, у яких як робоче тіло для приводу турбокомпресора використовується гарячий газ, одержуваний у спеціальних камерах згоряння при спалюванні дизельного палива, виконуються за двома схемами: з розімкненим газоповітряним контуром і замкнутим газоповітряним контуром.

# НУБІП України

У стендах з розімкненим газоповітряним контуром повітря в камеру згоряння подається від додаткового компресора, а повітря з ТКР через заслінку у випускному трубопроводі викидається в атмосферу. У стендах із замкнутим газоповітряним контуром повітря від додаткового компресора подається в камеру згоряння тільки в момент запуску, весь інший час повітря в камеру згоряння надходить з компресора ТКР.

# НУБІП України

Стенди повинні забезпечувати регулювання та підтримання температури олії в межах 65-95°C, мати прилади, необхідні для вимірювання ряду параметрів [92].

# НУБІП України

Однак, незважаючи на всі переваги безмоторних стендів, вони мають один загальний недолік - при роботі на цих стендах підшипниковий вузол турбокомпресора зазнає навантажень, відмінних від навантажень на працюючому двигуні. При роботі на двигуні завзятий підшипник турбокомпресора навантажується динамічною силою з частотою, що дорівнює частоті роботи циліндрів двигуна. Динамічна навантаження в 4-5 разів перевищує статичну, спрямовану у бік компресора (тобто. при роботі ТКР у стаціонарному потоці газу) під час роботи його на безмоторному стенді (рисунок 3.15) [1].

# НУБІП України

Виходячи з вищевикладеного для обкатки та випробування турбокомпресорів, відремонтованих за пропонуваною технологією, був застосований моторний стенд на базі двигуна СМД-60. Відповідно до технічних вимог на капітальний ремонт випробувальний стенд повинен забезпечувати регулювання та підтримання температури оливи в межах 65-

95°C. Крім того, стенд повинен мати прилади та обладнання, необхідні для вимірювання параметрів із заданою похибкою виміру (таблиця 3.1) [42].

Таблиця 3.1

Похибки параметрів вимірюваних на стенді для обкатки та випробування турбокомпресорів

Параметр	Погрішності
Частота обертання ротора	+1,0%
Температура газів перед турбіною	±10°C
Тиск газів перед турбіною	±0,01 кгс/см <sup>2</sup>
Тиск повітря на виході з компресора	±0,01 кгс/см <sup>2</sup>
Тиск оливи на вході в турбокомпресор	±0,25 кгс/см <sup>2</sup>
Температура оливи на вході в турбокомпресор та на виході з нього	±5°G
Витрата повітря через компресор (тільки для налаштування) $v$	±0,01 кг/с
Барометричний тиск	±0,13 кПа
Температура повітря на вході в компресор і турбіну	±1°C

Вимірювання числа оборотів ротора робили за допомогою індукційного датчика. Датчик встановлюється в патрубку вставки компресора навпроти граней гайки компресора, число імпульсів, від датчика реєструвалося електронно-лінійним частотоміром ЧЗ-33.

Перед випробуванням партії відремонтованих турбокомпресорів перевіряється технічний стан стенду. Для цього на стенд встановлюється еталонний турбокомпресор та проходить обкатку за програмою випробувань. При цьому фіксуються значення контрольованих параметрів.

У процесі обкатки на першому режимі перевіряються текти олії та газу через нещільність. При випробуванні параметри турбокомпресора повинні відповідати даним, зазначеним у таблиці 3.2.

# НУБІП України

Таблиця 3.2

Режими обкатки та прийомоздавальних випробувань турбокомпресора

ТКР-11Н-1

Частота обертання ротора, об/хв	Ступінь підвищення тиску компресора, не менше	Надлишковий тиск робочого тіла на вході в турбіну,	Температура робочого тіла на вході в турбіну, °С	Тиск оливи в турбокомпресорі, кгс/см <sup>2</sup>	Тривалість випробувань, хв.
20000-25000	-		-	3...4	2
35000±350	-	-	400+25	3...4	3
40000+400		-	550+25	3...4	4
45000+450	-		600+25	3...4	4
Контрольна точка					
45000+450	1,53...1,57	0,52...0,56	600+10	3...4	5

Робота на контрольному режимі служить основою приймання турбокомпресора. При цьому він повинен задовольняти такі вимоги:

- герметичність всіх з'єднань та корпусних деталей;
- відсутність при роботі сторонніх шумів та звуків;
- рівномірність роботи та стабільність параметрів;
- відсутність зачеплення ротора за нерухомі деталі.

## 3.6. Методика експлуатаційних випробувань відремонтованих турбокомпресорів.

Відремонтовані турбокомпресори, що відповідають технічним умовам на капітально відремонтовані вироби, будуть передаватися в рядову експлуатацію.

# НУБІП України

Кількість випробуваних об'єктів прийнято з умови, що відносна помилка не перевищує 0,2, при довірчій ймовірності 0,95 і коефіцієнті варіації 0,4. Тоді найменша кількість об'єктів випробувань при плані  $[N, U, r]$ , згідно з РД 50-690-89 дорівнює 15.

# НУБІП України

У процесі оптимізації технології відновлення деталей п'ятнадцять відремонтованих турбокомпресорів буде встановлено на трактори Т-150К щодо випробування. На підконтрольну партію заводиться журнал спостережень, у якому з періодичністю раз на два місяці заноситимуться відомості про технічний стан турбокомпресора та його напрацювання.

# НУБІП України

Оцінка показників надійності відремонтованих складальних одиниць будуть визначатися параметричним методом РД 50-690-89 виходячи з припущення, що закон розподілу ресурсу відремонтованих турбокомпресорів підпорядковується закону Вейбулла. Параметри розподілу Вейбулла  $\bar{a}$  і  $b$  будуть обчислюватися залежно від інформації, які будуть отримані в момент оцінки.

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1. Результати мікрометражних досліджень

Для дослідження дефектів і величини зношування деталей турбокомпресорів, що надійшли в ремонт, були проведені первинна дефектація та мікрометражні дослідження відповідно до методики, наведеної

в п.3.2. У таблиці 4.1 представлені основні види дефектів, виявлені в процесі проведення досліджень, а також існуючі (описані в параграфі 1.2) та запропоновані автором способи їх усунення.

Таблиця 4.1

Повторюваність дефектів деталей турбокомпресорів

Назва дефекту	Повторюваність дефекту		Спосіб усунення	
	Коефіцієнт	%	Наявний	Пропонований
1	2	3	4	5
1. Знос опорних поверхонь вала ротора під підшипник	0,8	80	Відрізка валу ротора. Перешліфування до ремонтного розміру. Хромування, зливання. Електроконтактне напикання порошків. Електроконтактне приварювання стрічки.	Електроіскрова обробка, притирання
2. Знос канавок під ущільнювальні кільця втулки ротора	0,75	75	Заміна втулки	Заміна втулки
3. Сліди зачеплення втулки ротора за нерухомі деталі	0,3	30	Заміна втулки	Заміна втулки
4. Згин вала ротора	0,2	20	Відрізка валу ротора, приварка заготівлі валу ротора з подальшою механічною обробкою. Перешліфування до ремонтного розміру.	Заміна вала ротора в зборі
1	2	3	4	5

5. Сліди зачеплення колеса турбіни за нерухомі деталі	0,08	80	Заміна вала ротора в зборі	Заміна вала ротора в зборі
6. Тріщини або обломи колеса турбіни будь-якого розміру та розташування	0,08	80	Заміна вала ротора в зборі	Заміна вала ротора в зборі
7. Зношування отвору корпусу середнього підшипник	0,51	51	Розточування під ремонтний розмір. Розточування та запресовування ремонтної втулки. Формоутворення зношеної поверхні композиційними матеріалами. Електролітичне цинк-нікелеве покриття. Електроконтактне приварювання стрічки.	Електроіскрова обробка, механічна обробка
8. Зношування поверхні середнього корпусу (втулки) під ущільнювальні кільця	0,8	80	Розточування середнього корпусу, запресування ремонтної втулки.	Електроіскрова обробка, механічна обробка
9. Знос отвору підшипника під вал ротора	0,72	72	Обтискання по зовнішньому діаметру. Термодифузійне нарощування.	Електроіскрова обробка, механічна обробка, притирання
10. Знос отвору підшипника під фіксатор	0,72	72	Розточування та запресовування ремонтної та втулки з подальшою механічною обробкою.	
11. Знос зовнішньої поверхні підшипника	0,5	50	Обтискання по зовнішньому діаметру фігурними роликками з подальшою механічною обробкою. Термодифузійне нарощування. Електроконтактне приварювання стрічки. Газоплазмине напилення порошка.	
12. Знос торцевих поверхонь підшипника	0,61	61	Термодифузійне нарощування.	
13. Знос поверхні диска ущільнення компресора під ущільнювальні кільця	0,76	76	Розточування і постановка ремонтної втулки.	Електроіскрова обробка, механічна обробка



14. Знос поверхні фіксатора під підшипник	0,3	30	Обточування та постановка ремонтної втулки.	Електроіскрова обробка, механічна обробка, притирання
15. Знос масловідбивача по висоті	0,79	79	Заміна масловідбивача	Електроіскрова обробка, притирання
16. Зношування канавок масловідбивача під ущільнювальні кільця	0,62	62	Заміна масловідбивача	Заміна масловідбивача
17. Сліди зачеплення зовнішньої поверхні масловідбивача за диск ущільнення	0,25	25	Заміна масловідбивача	Заміна масловідбивача

На рисунку 4.1. представлені характерні дефекти деталей турбокомпресора.

У вузлі підшипників найбільшим зносам піддаються поверхні бронзового підшипника, що має невисоку твердість, що контактують з деталями, що обертаються ротора. Величина зносу отвору під вал ротора більша з боку торців підшипника - в перерізах 1, 4 (див. рис. 3.3). Це пов'язано з перекосом ротора, що обертається. Також зношування з боку колеса турбіни більше, ніж з боку колеса компресора, що пов'язано з великим биттям важкого колеса компресора.

Зношування по зовнішньому діаметру також нерівномірний, епора зносу підшипника має бочкоподібну форму (у перерізах 1, 4 см. рисунок 3.3 величина зносу більше). На зовнішній поверхні підшипника є сліди кавітаційних явищ у вигляді поперечних і поздовжніх борозен і раковин.

Зношування отвору під фіксатор більше в поперечному перерізі, ніж у поздовжньому. Такий характер зносу пов'язаний з «сиробами» повернути підшипник, при зачіпанні ротором, що обертається, за поверхні втулки підшипників.

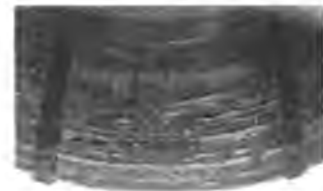
НУБІП України

НУ

НИ



а)



б)



в)



г)

НУ

НИ

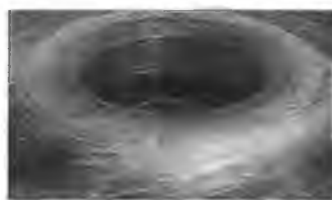


д)



НУ

НИ



е)



Рис. 4.1. Характерні зношування деталей турбокомпресора: а) - знос поверхні валу ротора під підшипник; б) - знос отвору підшипника під вал ротора; в) - знос горцевих поверхонь підшипника; г) - знос торцевої поверхні маслорозбивача; д) - знос поверхні фіксатора, що контактує з підшипником; е) - знос втулки (середнього корпусу) під ущільнювальні кільця; ж) - знос зовнішньої поверхні підшипника та отвори підшипника під фіксатор.

НУБІП України

На торцевих поверхнях підшипника, крім лінійного зносу, присутні концентричні риски, глибиною до 0,6 мм.

Епюри зносу опорної поверхні валу ротора мають конусоподібну форму.

Зношування в перерізах 1, 4 (див. рис. 3.2), що розташовуються ближче до кінців валу, більше, ніж у середині. При цьому зношування шийки валу з боку

НУБІП України

# НУБІП УКРАЇНИ

колеса турбіни більше, ніж з боку колеса компресора у зв'язку з впливом великих відцентрових сил від неврівноважених мас важкого колеса турбіни. У втулки ротора зношуються також канавки під кільця ущільнювачів по ширині.

# НУБІП УКРАЇНИ

У отвори середнього корпусу під підшипник найбільше зношування спостерігається в перерізах 2, 3 (див. рис. 3/5), розташованих ближче до протоки між опорними шийками, що, ймовірно, пов'язано з кавітацією при витіканні масла під тиском через отвір невеликого перерізу.

# НУБІП УКРАЇНИ

Отвори під кільця ущільнювача середнього корпусу і диска ущільнення компресора зношуються не по всій довжині, а лише в місцях переміщення ущільнювальних кілець в поздовжньому напрямку. Знос поверхонь під кільця ущільнювача середнього корпусу більше, ніж у диска ущільнення. Це пов'язано з великими амплітудами вібрації ротора з боку більш важкого турбіни колеса і, ймовірно, зі зниженням твердості втулки (в середньому корпусі) через багаторазового нагріву до температури відпустки сталі, під час тривалої роботи під навантаженням.

# НУБІП УКРАЇНИ

Поверхня фіксатора, що контактує з підшипником, сильніше зношується в перпендикулярному напрямку: осі ротора. Це пов'язано зі спробами ротора при обертанні повернути підшипник, чому, і перешкоджає фіксатор.

# НУБІП УКРАЇНИ

Масловідбивач зношується по висоті, а також зношується канавка під кільце ущільнювача по ширині. Крім лінійного зношування на поверхні масловідбивача, зверненої до підшипника, присутні концентричні ризики, глибиною до 0,3 мм.

# НУБІП УКРАЇНИ

Попередньо вимірювалася висота ущільнювальних кілець. У них зношується торцева поверхня, що контактує з бічними стінками канавок, а також зовнішня циліндрична поверхня від переміщення в поздовжньому напрямку. Однак за технічними вимогами на капітальний ремонт вони підлягають 100% заміні, так як під час експлуатації від дії високих температур втрачають свої пружні властивості, тому в подальшому виміри не проводилися.

# НУБІП УКРАЇНИ

Аналізуючи принцип роботи турбокомпресора та за даними первинної дефектації можна зробити такі висновки, що такі дефекти, як сліди зачеплення

втулки ротора за нерухомі деталі (дефект №3, табл. 4.1), сліди зачеплення

колеса турбіни за нерухомі деталі (№5, табл. 4.1), сліди зачеплення зовнішньої

поверхні масловідбивача за диск ущільнення (№17, табл. 4.1) є наслідком

збільшення радіального зазору підшипникового вузла: дефекти № 1,9 (див.

табл. 4.1) - збільшення зазору в поєднанні «вал ротора - підшипник» і 7, 11 (див.

таблиця 4.1) - збільшення зазору в поєднанні «підшипник - середній корпус»

Збільшення зазору в поєднанні «фіксатор - отвір підшипника» (дефекти

№10 та №14, див. табл. 4.1), знос торцевих поверхонь підшипника (дефект №

12, див. табл. 4.1) та знос масловідбивача по висоті (дефект №15, див. табл.4.1)

призводять до збільшення осевого люфту ротора і зачеплення радіусною

частиною лопаток колеса турбіни і компресора за нерухомі деталі.

Збільшення осевого люфту ротора також викликає посилений знос

ущільнювальних кілець по зовнішньому діаметру і поверхонь диска, що

сполучаються з ними, ущільнення компресора під ущільнювальні кільця

(дефект № 13, див. табл. 4.1) і поверхні середнього корпусу (втулки) під

ущільнювальні кільця (дефект №8 див. таблицю 4.1).

#### **4.2. Вибір раціональних технологічних режимів ЕІО підшипника турбокомпресора.**

Відновлення зовнішньої поверхні підшипника проводилося у

механізованому режимі. При цьому для зменшення гідроабразивного та

кавітаційного зносу передбачалося підвищити твердість поверхні за рахунок

нанесення матеріалів, що володіють твердістю більше, ніж матеріал основи.

Виходячи з цього, на зразки наносилися різні матеріали: сталі Ст3, сталь 85,

бронзи БрОС10-10, БРАЖ9-4 і БРАЖМц 10-3-1,5.

Однак позитивні результати (за товщиною шару) були отримані лише

для бронзи БрОС 10-10. Для інших матеріалів процес ЕІО в механізованому

режимі призводить до зменшення розмірів оброблюваної поверхні, це

пов'язано з механічним впливом більш твердого ніж основа обертається електрода на поверхню зразка (відбувається пластичне деформування матеріалу основи).

Для відновлення зовнішньої поверхні втулки підшипників виготовлених з бронзи БрОС 10-10 обрані наступні режими обробки: електрод БрОС 10-10 05 мм, режим установки Р-5, частота обертання деталі  $n = 11,2$  про хв, подача електрода  $S = 0,23$  мм/про.

Для забезпечення мінімального коефіцієнта в парі тертя "вал ротора - підшипник" на зразки з бронзи БрОС 10-10 наносили матеріали наступних марок: мідь МІ, бронзи: БрОС10-10, БрОНС5-5-5, БрКМц3-1, БрАЖМц10-3-1,5, БрАЖ9-4 та БрАМц9-2.

Встановлено, що при обробці бронзи БрОС10-10 електродами з перерахованих вище матеріалів, максимальну товщину шару можна отримати лише при наплавленні бронзою БрАЖ9-4. Оптимальний час наплавлення 5 хв, частоті вібрації електрода 250 Гц, тривалості затримки електрода 2 мс, амплітуді вібрації електрода 5 одиниць. При цьому товщина шару коливається в межах 150-190 мкм при суцільності 65-70%.

Так як оптимальна працездатність підшипникового вузла забезпечується при вмісті в бронзі олова не менше 10% [1], було поставлено завдання нанести шар металопокриття з бронзи, що задовольняє цю умову (бронза БрОС 10-10). При ЕІО зразків електродами з бронзи БрОС10-10 товщина шару металопокриття не перевищує 80 мкм, що недостатньо для компенсації зносів деталі, що розглядається.

У роботах [18,76], при ЕІО бронзових деталей, запропоновано для збільшення товщини нанесеного шару використовувати багат шарові покриття (до чотирьох шарів) та як перший шар (підшару) використовувати нікель.

Тому було проведено серію експериментів з нанесення багат шарових покриттів на бронзу БрОСІ 0-10 за допомогою установки «Елітрон-22БМ» (див. рис. 1.4).

НУБІП України

Нікелевий підшар на бронзу БрОС10-10 наносився на різних енергетичних режимах установки при різних частотах, амплітуді вібрації електрода, тривалості затримки електрода. Потім наносився основний (другий) шар електродом з бронзи БрОС 10-10 також за різних технологічних режимах установки.

НУБІП України

Вибір режимів проводився з необхідності нанесення другого шару максимальної товщини з суцільністю не нижче 75%.

НУБІП України

Експериментальними дослідженнями встановлено, що найкращі результати при нанесенні нікелю досягаються на 4 енергетичному режимі установки при частоті обробки 200-250 Гц.

НУБІП України

В процесі експерименту зміну товщини шару та маси електрода та зразка фіксували через 30с.

НУБІП України

Оптимальний час наплавлення другого шару становить 3,5 хв. При цьому товщина досягає 250-300мкм при суцільності 60-65%. Після механічної обробки (шліфування на плоскошліфувальному верстаті) покриття суцільності не нижче 75% залишкова товщина наплавленого шару становить 150-180 мкм. Отже, ЕО зразків із бронзи БрОС 10-10 нікелем призводить до збільшення загального шару металопокриття із бронзи БрОС10-10 у 3-3,5 рази.

НУБІП України

У зв'язку з тим, що товщина двошарового покриття недостатня для компенсації максимальних зносів отвору підшипника під вал ротора (див.п.4.1) були проведені дослідження з наплавлення третього шару нікелевим електродом, а потім четвертого шару бронзами БрОС 10-10 і БРАЖ9- 4.

НУБІП України

При цьому зазначено, що при наплавленні четвертого шару бронзою БРАЖ9-4 відбувається відшаровування попередніх шарів від матеріалу основи при перегріванні електрода, тобто електрод необхідно періодично охолоджувати зануренням у воду. При наплавленні четвертого шару електродом БрОС 10-10 відшаровування не відбувається.

НУБІП України

# НУБІП України

Після проведення експерименту було виділено чотири можливі варіанти нанесення багатшарових покриттів на установці «Елітрон-22БМ» ручним вібратором:

# НУБІП України

- 1 - Ni + БРАЖ9-4 + Ni + БРАЖ9-4;
- 2 - БРАЖ9-4 + Ni + БРАЖ9-4;
- 3 - Ni + БРАЖ9-4 + Ni + БрОС10-10;
- 4 - Ni + БрОС10-10.

Результати вибору раціональних режимів обробки на зразки із бронзи

БрОС 10-10 зведені в таблиці 4.7.

# НУБІП України

Остаточний вибір матеріалу електрода для відновлення валу ротора та втулки підшипників проводиться за результатами металографічних досліджень та триботехнічних випробувань на машині тертя.

## 4.3. Раціональні технологічні режими ЕІО зношених деталей турбокомпресорів.

# НУБІП України

Для вибору режимів ЕІО зношених поверхонь інших деталей типу тіло обертання, виготовлених зі сталі - отвори втулки (середнього корпусу) та диска ущільнення компресора під кільця ущільнювача, поверхня фіксатора під підшипник - були використані дані експериментів, проведених у п.4.2.

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

Матеріал покриття та номер шару	Загальна товщина шару на сторону h, мкм	Технологічні режими установки «Елітрон 22БМ»
1. Нікель 2. БрАЖ9-4 3. Нікель 4. БрАЖ9-4	350-400	P-4, f=250 Гц, τ=2,5 мс, t=0,5 хв/см <sup>2</sup> ; P-5, f=250 Гц, τ=2 мс, t=2,5 хв/см <sup>2</sup> P-4, f=250 Гц, τ=2,5 мс, t=0,5 хв/см <sup>2</sup> P-5, f=200 Гц, τ=2,5 мс, t=2,5 хв/см <sup>2</sup>
1. БрАЖ9-4 2. Нікель 3. БрАЖ9-4	350-400'	P-5, f=250 Гц, τ=2 мс, t=2,5 хв/см <sup>2</sup> P-4, f=250 Гц, τ=2,5 мс, t=0,5 хв/см <sup>2</sup> P-5, f=200 Гц; τ=2 мс, t=3 хв/см <sup>2</sup>
1. Нікель 2. БрАЖ9-4 3. Нікель 4. БрОС10-10	310-350	P-4, f=250 Гц, τ=2,5 мс, t=0,5 хв/см <sup>2</sup> P-5, f=250 Гц, τ=2 мс, t=2,5 хв/см <sup>2</sup> P-4, f=250 Гц, τ=2,5 мс, t=0,5 хв/см <sup>2</sup> P-5, f=200 Гц, τ=2 мс, t=3 хв/см <sup>2</sup>
1. Нікель 2. БрОС10-10	150-180	P-4, f=250 Гц, τ=2,5 мс, t=0,5 хв/см <sup>2</sup> P-5, f=200 Гц, τ=2 мс, t=3,5 хв/см <sup>2</sup>

Примітка - P – енергетичний режим установки; f-частота вібрації електрода; τ – тривалість затримки електрода; t - час обробки

При ЕЮ отвори втулки (середнього корпусу) і диска ущільнення компресора під кільця ущільнювача обробний пристрій КПМ-20 повертається щодо осі обертання 1 деталі на кут 45-50°. Для збільшення товщини наплавленого шару подачу електрода знизили до  $S_{ел} = 0,13$  мм/об.

При відновленні фіксатора, виготовленого з ливарної сталі 40Л (твердість 146-173НВ) з режимами P-5,  $n_d = 11,2$  об/хв,  $S_{ел} = 0,13$  мм/об товщина наплавленого шару збільшується на 20-25% порівняно з термообробленою сталлю 40X (твердість 39-49 HRC).

Для відновлення отвору корпусу середнього підшипник, виготовленого з алюмінієвого сплаву Al9 в ручному режимі ЕЮ застосовується електрод Al9 Ø5 мм з наступними технологічними режимами: режим установки P-5, частота вібрації електрода  $f_{ел} = 300$  Гц, час затримки електрода  $\tau_{ел} = 3,5$  мс, час обробки  $t_{уд} = 3$  хв/см<sup>2</sup> [89].



# НУБІП України

Для відновлення масловідбивача виготовленого зі сталі 45Х (твердість 37-44HRC) по висоті в ручному режимі ЕІО застосовується електрод У10

Ø4 мм з технологічними режимами установки Р-5,  $f_{ел} = 200$  Гц,  $\tau_{ел} = 3,5$  мс,

$t_{уд} = 4$  хв/см<sup>3</sup> [31].

# НУБІП України

Результати досліджень з вибору матеріалів електродів та раціональних технологічних режимів ЕІО наведено у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8

Раціональні технологічні режими ЕІО деталей турбокомпресора

Деталь	Матеріал деталі	Матеріал електрода	Спосіб обробки	Товщина шару, мкм	Технологічні режими
1	2	3	4	5	6
Вал ротора	Сталь 40Х	Сталь 85	Механізований	200	Р-5, $n_d = 11,2$ мин <sup>-1</sup> , $n_{ел} = 3500$ мин <sup>-1</sup> , $S_{ел} = 0,19$ мм/об, $d_{ел} = 3$ мм
Підшипник	Бронза БрОС 10-10	Бронза; БрОС 10-10	Механізований	60	Р-5, $n_d = 11,2$ мин <sup>-1</sup> , $n_{ел} = 3500$ мин <sup>-1</sup> , $S = 0,23$ мм/об, $d_M = 5$ мм'
Підшипник	Бронза БрОС 10-10	Ni+ БрОС 10-10	Ручним вібратором	250	Р-4, $f = 250$ Гц, $\tau = 2,5$ мс, $t = 0,5$ мин/см <sup>2</sup> . Р-5, $f = 200$ Гц, $\tau = 2$ мс, $t = 3,5$ мин/см <sup>2</sup> .
Підшипник	Бронза БрОС.10-10	Ni+ БрАЖ9-4 + Ni + БрОС 10-10	Ручним вібратором	350	Р-4, $f = 250$ Гц, $\tau = 2,5$ мс, $t = 0,5$ мин/см <sup>2</sup> ; Р-5; $f = 250$ Гц, $\tau = 2$ мс, $t = 2,5$ мин/см <sup>2</sup> Р-4, $f = 250$ Гц, $\tau = 2,5$ мс, $t = 0,5$ мин/см <sup>2</sup> ; Р-5, $f = 200$ Гц, $\tau = 2$ мс,
Корпус середній	Ал 9-	Ал9'	Ручним вібратором	190;	Р-5, $f = 300$ Гц, $\tau = 3,5$ мс, $t = 3$ мин/см <sup>2</sup>
Втулка(середнього корпусу) під ущільнювальні кільця	Сталь 45Х	Сталь. 85	Механізований	250	Р-5; $n_d = 11,2$ мин <sup>-1</sup> , $n_{ел} = 3500$ мин <sup>-1</sup> , $S = 0,13$ мм/об, $d_{ел} = 3$ мм
Диск ущільнення компресора					
Масловідбивач	Сталь 45Х.	У10	Ручним вібратором	ISO;	Р-5, $f = 200$ Гц, $\tau = 3,5$ мс, $t = 4$ мин/см <sup>2</sup>

# НУБІП України

НУБІП України

Деталь	Матеріал деталі	Матеріал електрода	Спосіб обробки	Товщина шару, мкм	Технологічні режими
Фіксатор	Сталь 45Л	Сталь 85	Механізований	250	$P=5, n_d=11,2 \text{ мин}^{-1}$ , $N_{\text{ел}}=3500 \text{ мин}^{-1}$ , $S=0,13 \text{ мм/об}$ , $d_{\text{ел}}=3 \text{ мм}$

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# НУБІП України

## РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ТУРБОКОМПРЕСОРА ТА ОЦІНКА ЙОГО ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

### 5.1. Розробка технологічного процесу відновлення турбокомпресора методом ЕІО.

Технологічні процеси проектуються відповідно до вимогами 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: маршрутні карти (МК), карти ескізів (КЕ), операційні картки (ОК), карти технологічних процесів (КТП), карти типових технологічних процесів (КТТП) та відомості оснастки (ВО).

Вихідні дані для проектування технологічного процесу відновлення гідронасосів наступні:

1. Відомості про дефекти та передбачувану програму відновлення деталей. Очікувана програма відновлення для Навчально-науково-виробничого центру становила 100 турбокомпресорів на рік.

2. Організаційна форма відновлення деталей: При розробці технологічного процесу слід враховувати можливості ремонтних підприємств та їхнє технічне оснащення.

3. Вибраний раціональний спосіб усунення дефектів по кожному маршруту. Експериментальні дослідження показали, що найбільше оптимальним способом відновлення є електроіскрова обробка.

4. Схеми технологічних процесів усунення кожного дефекту;
5. 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 (поверхні); На основі проведених досліджень

# НУБІП України

розроблено технологічний процес ремонту турбокомпресорів із відновленням зношених деталей методом ЕЮ. Маршрут даного технологічного процесу I наведено у таблиці 5.1.

# НУБІП України

Економічний ефект від запровадження технологічного процесу визначається з порівняння наведених витрат на відновлення базової та пропонованої технології

# НУБІП України

$$E = (C_{\text{баз}} - C_{\text{проп}} \cdot \frac{P_2}{P_1}) \cdot N \quad (5.1)$$

$C_{\text{баз}}$  – собівартість відновлення турбокомпресора за базовим способом (перешліфування валаротора під ремонтний розмір та виготовлення ремонтної

# НУБІП України

втулки підшипників) складає  $C_{\text{баз}} = 1976,5$  грн.;

$C_{\text{проп}}$  – собівартість відновлення турбокомпресора по розробленій технології, грн.;

$P_1, P_2$  – середні міжремонтні ресурси відновлених гідронасосів за пропонованою технологією ( $P_1 = 3140$  годин) та базовим методом ( $P_2 = 5600$  годин),

# НУБІП України

$N$  – програма відновлення, шт.

Собівартість відновлення за новим способом розраховується за формулою

# НУБІП України

$$C_{\text{відн}} = C_{\text{озп}} + C_{\text{дзп}} + C_{\text{сс}} + C_{\text{м}} + C_{\text{тзв}} + C_{\text{ц}} + C_{\text{о}} + C_{\text{пв}} + C_{\text{зз}} + C_{\text{пкв}} \quad (5.2)$$

де  $C_{\text{озп}}$  – основна зарплата виробничих робітників, грн.;

$C_{\text{дзп}}$  – додаткова зарплата, грн.;

$C_{\text{сс}}$  – нарахування із соціального страхування, грн.;

# НУБІП України

$C_{\text{м}}$  – вартість матеріалів, грн.;

# НУБІП України

$C_{ТЗВ}$  - транспортно-заготівельні витрати на матеріал, грн.;

$C_{Ц}$  - цехові витрати, грн.;

$C_{0}$  - витрати на утримання обладнання, грн.;

$C_{ПВ}$  - позавиробничі витрати, грн.;

$C_{ЗЗ}$  - загальнозаводські витрати, грн.;

$C_{ПКВ}$  - питомі витрати на капітальні вкладення, грн.

# НУБІП України

Нами доведено можливість відновлення зношених деталей

турбокомпресора методом ЕІО. Застосування цієї перспективної технології дозволяє забезпечити середній ресурс відновлених агрегатів на рівні нових.

Проведемо розрахунок собівартості відновлення за цим варіантом технології.

# НУБІП України

Основна зарплата на відновлення одного турбокомпресора

$$C_{ОЗП} = k_{В} \cdot T_{В} \quad (5.3)$$

# НУБІП України

де  $k_{В}$  - норма часу відновлення одного агрегату (по хронометражу) 7 год.;

$T_{В}$  - годинна тарифна ставка слюсаря IV розряду, грн.  $T_{В} =$

18,35 грн/год.

# НУБІП України

$$C_{ОЗП} = 7 \cdot 18,35 = 128,45 \text{ грн.}$$

Додаткова заробітна плата

# НУБІП України

$$C_{ДЗП} = \frac{30 \cdot C_{ОЗП}}{100}, \quad (5.4)$$

$$C_{ДЗП} = \frac{30 \cdot 128,45}{100} = 38,5 \text{ грн}$$

Нарахування із соціального страхування

# НУБІП України

НУБІП України

$$C_{cc} = \frac{37,1 \cdot (C_{озп} + C_{дзп})}{100} \quad (5.5)$$

$$C_{cc} = \frac{37,1 \cdot (128,45 + 38,5)}{100} = 62,0 \text{ грн}$$

НУБІП України

Вартість матеріалу визначаємо за формулою

$$C_m = \sum(k_m C_m), \quad (5.6)$$

НУБІП України

Вартість 1 кг електродів складає: алюмінієвого сплаву Ал9 - 86 грн, сталі 85 - 60 грн, сталі У10 - 79 грн, бронзи БрОС10-10 - 81 грн, нікелю - 182 грн. Витрата на один турбокомпресор складає відповідно

$$K_{Ал9} = 0,005 \text{ кг}, K_{85} = 0,020 \text{ кг}, K_{У10} = 0,005 \text{ кг}, K_{Бр} = 0,015 \text{ кг}, K_{Ni} =$$

0,005 кг. Вартість 1 кг алмазної пасті АСМ 7/5 ГОСТ 9206-80 складає 4400 грн, витрата на один турбокомпресор -  $K_{пр} = 0,0012 \text{ кг}$

НУБІП України

$$C_m = 10 \text{ грн}$$

Транспортно-заготівельні витрати на матеріал складають

НУБІП України

$$C_{тзв} = \frac{12 \cdot C_m}{100}, \quad (5.7)$$

$$C_{тзв} = \frac{12 \cdot 10}{100} = 1,2 \text{ грн}$$

НУБІП України

Цехові витрати

$$C_{ц} = \frac{116,3 \cdot C_{озп}}{100}, \quad (5.8)$$

$$C_{ц} = \frac{116,3 \cdot 128,45}{100} = 149,7 \text{ грн.}$$

НУБІП України

Витрати на утримання обладнання

НУБІП України

$$C_o \frac{118,3 \cdot C_{озп}}{100}, \quad (5.9)$$

НУБІП України

$$C_{зц} \frac{118,3 \cdot 128,45}{100} = 152,0 \text{ грн.}$$

Загальнозаводські витрати:

$$C_{зц} \frac{73,7 \cdot C_{озп}}{100}, \quad (5.10)$$

НУБІП України

$$C_{зц} \frac{73,7 \cdot 128,45}{100} = 94,6 \text{ грн.}$$

Позавиробничі накладні витрати

НУБІП України

$$C_{пв} = \frac{1,116 \cdot (C_{озп} + C_{дзк} + C_{сс} + C_m + C_{стзв} + C_{пц} + C_o + C_{пв})}{100}, \quad (5.11)$$

$C_{пв} = 4,56 \text{ грн.}$

Питомі витрати на капітальні вкладення

НУБІП України

$$C_{укв} = E \cdot \frac{C_{уст1} + C_{до} + C_{пр} + C_{гп} + C_{бв} + C_{тв}}{N}, \quad (5.12)$$

де  $E$  – коефіцієнт ефективності капітальних вкладень,  $E = 0,15$ ;

$C_{уст1}$  - ціна устаткування «Елітрон -22Б»,  $C_{уст1} = 65200 \text{ грн.}$ ;

$C_{до}$  - вартість додаткового обладнання (КПМ-20),  $C_{до} = 15000 \text{ грн.}$ ;

$C_{пр}$  - вартість пристроїв,  $C_{пр} = 3000 \text{ грн.}$ ;

$C_{гп}$  - вартість гідравлічного преса,  $C_{гп} = 58000 \text{ грн.}$ ;

$C_{бв}$  - вартість балансувального верстата,  $C_{бв} = 125000 \text{ грн.}$ ;

$C_{тв}$  - вартість токарного верстата 1А616,  $C_{тв} = 170000 \text{ грн.}$

НУБІП України

# НУБІП України

Питомі витрати на капітальні вкладення із програмою ремонту N = 100 турбокомпресорів на рік становитимуть

$$C_{\text{увв}} = 0,15 \cdot \frac{65200+15000+3000+125000+58000+170000}{100} = 654,3 \text{ грн.},$$

Тоді собівартість відновлення одного турбокомпресора методом ЕЮ дорівнюватиме  $C_{\text{відн}} = 1295,41$  грн.

Звідси

$$E = (1976,5 - 1295,41 \cdot 3140/5600) \cdot 100 = 125\,075 \text{ грн/рік}$$

Таким чином економічний ефект від впровадження запропонованої технології відновлення турбокомпресорів методом ЕЮ становить 125 075 грн. на програму ремонту 100 агрегатів на рік, в порівнянні з базовою технологією, що передбачає перешліфування валу ротора на ремонтний розмір,

виготовлення підшипника, виготовлення та встановлення ремонтних втулок в середній корпус, диск ущільнення компресора та на фіксатор.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України



# НУБІП України

## ВИСНОВКИ

1. Основною причиною відмов турбокомпресорів є низька зносостійкість спряжень «вал ротора - підшипник» і «підшипник - корпус», торцеві поверхні підшипника, втулки та масловідбивача, що приводять у середньому за 1950 мотогодин до збільшення радіального та осевого зазорів підшипників.

2. При зміні зазору в поєднанні «підшипник – корпус» з 0,060 - 0,107 мм до 0,090 - 0,149 мм; переміщення кінця ротора і навантаження на підшипниковий вузол зменшуються до 1,5 разів.

3. В результаті мікрометражних досліджень деталей турбокомпресорів, що надійшли в ремонт, виявлено, що відновленню підлягають 100% валів роторів (поле розсіювання зносу 2-70 мкм, при  $m_x = 24,62$  мкм;  $\sigma_x = 15,65$  мкм) і підшипників (розсіювання зносу 4-382 мкм, при  $m_x = 150,0$  мкм,  $\sigma_x = 93,1$  мкм).

4. Встановлено матеріали електродів та раціональні технологічні режими електроіскрової обробки валу ротора сталлю 85 - режим установки Р-5, частота обертання деталі  $n_d = 11,2$  об/хв, поздовжня подача електрода  $S = 0,19$  мм/об; кількість проходів,  $t = 1$ ; - підшипника турбокомпресора – нікелевим електродом – Р-4, частота вібрації електрода  $f = 250$  Гц, тривалість затримки електрода;  $t = 2,5$  мс, час обробки  $t = 0,5$  хв/см, електродом із бронзи, БрОС 10-10 - Р-5,  $f = 200$  Гц,  $t = 2$  мс,  $t = 3,5$  хв/см<sup>2</sup> для створення покриттів, необхідних для відновлення зношених деталей турбокомпресорів.

5. Експлуатаційні випробування, відремонтованих за новою технологією турбокомпресорів, у господарствах Черкаської області показали, що нижня ймовірна межа прогнозованого середнього ресурсу становить 5600 годин, що, вже вище середнього ресурсу нових турбокомпресорів вдвічі.

6. Розроблений та впроваджений у виробництво новий енерго- та ресурсозберігаючий технологічний процес ремонту турбокомпресора ТКР-11-Н1 відновленням зношених деталей електроіскровою обробкою, що дозволяє

НУБІП України

знизили споживання електроенергії до 1,4 рази порівняно з базовою технологією, забезпечує підвищення міжремонтного ресурсу агрегату в два і більше разів. За пропонованою технологією можливість відновлення:

зношених деталей збільшується з 0,1 до 0,98, що призводить до підвищення повного ресурсу турбокомпресора за весь термін служби. Очікуваний економічний ефект від ремонту турбокомпресорів становить 125075 гривень на програму ремонту 100 штук на рік.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# НУБІП України

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Автомобильные двигатели с турбонаддувом / Н.С. Ханин, Э.В. Аболтин, Б.Ф. Дьячнев и др. М.: Машиностроение, 1991. 336 с.
2. Адлер А.А., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1971. 284с.
3. Алиев А.Е. Упрочнение и восстановление шпинделей хлопкоуборочной машины СХМ-48; электроискровым методом. Автореф, дисс. на соиск. ученой степени к.т.н. Ашхабад, 1953. 16 с.
4. Антонов В.И. Динамика параметров турбокомпрессоров И; экономичности: дизелей; в процессе эксплуатации. II Совершенствование методов использования техники в полеводстве: сб науч трудов. Зеленоград; ВНИПТИМЭСХ, 1990. С.46-51. Международная научно-техническая; конференция «Новые методы ремонта и восстановления; деталей сельскохозяйственных машин»: Сборник материалов Саранск: Изд-во Мордовского государственного университета, 2001.
5. Артемьев Ю.Н., Очковский Н.А. Расчетные уравнения и таблицы по курсу «Основы: надежности сельскохозяйственной техники». Метод. указания М: 1976. 30 с.
6. Асбель А.Б., Жегалин О.И. Развитие систем и агрегатов наддува: // Тракторы и сельскохозяйственные машины, № 7, Л: 1987, С. 6-21
7. Ахмедов Г.М., Вельских В.И. Определение мощности дизелей с газотурбинным наддувом // Техника в сельском хозяйстве, №9; 1979. С.55-58.
8. Ачкасов К. А. Прогрессивные способы ремонта сельскохозяйственной техники. М.: Колос, 1984. 271с.
9. Банков Б.П., Еордуков В.И., Иванов П.В. и др. Турбокомпрессоры. для наддува дизелей. Л.: Машиностроение, 1975. 199 с.
10. Барышников С.А. Восстановление изношенных валов сельскохозяйственной техники; электроконтактным напеканием: смеси металлических порошков с последующим: упрочнением (на примере вала

ротора турбокомпрессора). Автореф. дисс. на соискание ученой степени;  
канд. технич. наук. Челябинск, 1998: 17 с.

11. Белоглазов Н.С. Исследование технического состояния турбокомпрессоров дизельных двигателей; поступающих: в I капитальный ремонт. // Совершенствование ремонта сельскохозяйственной техники, Сб. науч. тр. ЧИМЭСХ.- Челябинск, 1982: С51-52.

12. Белоглазов Н.С. Методика оценки ресурса? Капитально отремонтированных: турбокомпрессоров дизелей по результатам стендовых испытаний. Кандидатская диссертация. - Челябинск: ЧИМЭСХ, Л 997. 199 с.

13. Белоглазов Н.С. Основные факторы, влияющие: на долговечность турбокомпрессоров дизельных двигателей. // Совершенствование организации технологии восстановления изношенных деталей, Сб.; науч. тр. ЧИМЭСХ.- Челябинск, 1984. С. 67-69;

14. Большев Л.Н., Смирнов-Н;В: Таблицы математической статистики. М: Наука, 1965. 474 с.

15. Будыльский; Г.П., Кириченко Ю.К. Шмидт В.П. Восстановление роторов турбокомпрессоров // Техника в сельском хозяйстве, №3., 1981. С.45;

16. Бурумкулов Ф.Х. и др. Параметры микрогеометрии; и задиростойкость поверхностей; образованных электроискровой обработкой. / Сварка Урала-200Н Нижний Тагил, 2001; с. 129-137

17. Бурумкулов Ф.Х., Беляков А.В., Бушма П.А., Иванов В.И., Лезин П.П., Лельчук Л.М., Сенин Л.В., Поддубняк В.Я. Электроискровая наплавка, упрочнение и легирование рабочих поверхностей; деталей, штамповой оснастки и; режущих кромок инструментов / Восстановление и упрочнение деталей машин: Труды ВНИИТУВИД «Ремдеталь». М: 1999 с. 171-203.

18. Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Л.М., Пушкин И.А., Иванов В.И., Методические и теоретические предпосылки: к прогнозу эрозионной стойкости анода и катода при ЭИН. // Международная научно-техническая конференция «Новые методы ремонта и восстановления деталей

сельскохозяйственных машин»: Сборник материалов – Саранск: Изд-во Мордовского государственного университета, 2001. С.6-15.

19. Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Л.М., Пушкин И.А., Фролов С.Н.

Микрогеометрия и несущая способность поверхности, образованной электроискровой наплавкой. // Технология машиностроения, №4, 2001. С. 29-34.

20. Бурумкулов Ф.Х., Лялякин В.П., Иванов В.И.; Повышение

износостойкости инструментов электроискровым упрочнением. //Техника в сельском хозяйстве, 2001, № 4, с.29-34.

21. Бурумкулов Ф.Х., Лялякин В.П., Пушкин И.А., Фролов С.Н.

Электроискровая обработка металлов - универсальный способ восстановления изношенных деталей. //Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2001, №4 с. 23-28;

22. Бутовский М.Э. Нанесение покрытий и упрочнение материалов,

концентрированными потоками энергии. Часть 2. Оборудование для электроэрозионного легирования. Учебное пособие. М.: ИКФ «Каталог», 1998. 158 с.

23. Величко С.А. Восстановление и упрочнение электроискровой

наплавкой изношенных отверстий чугунных корпусов, гидрораспределителей. Кандидатская диссертация. - Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 2000. 239 с.

24. Величко С.А., Раков Н.В. Результаты экспериментальной оценки

времени электроискровой наплавки различными электродами на стальные и чугунные детали / Международная научно-техническая конференция «Новые методы ремонта и восстановления деталей сельскохозяйственных машин»:

Сборник материалов – Саранск: Изд-во Мордовского государственного университета, 2001. С. 99-102.

25. Верхотуров А.Д. и др. Влияние термической обработки стали 45 на

свойства ее поверхностного слоя, после электроискрового легирования.// Электронная обработка материалов, №4. С.23-25.

26. Верхотуров А.Д. Исследование закономерностей процесса электроискрового легирования металлических поверхностей тугоплавкими металлами и соединениями. Автореф. канд. дисс. - Кишинев, 1971.

27. Верхотуров А.Д., Воронкин М.А., Анфимов И.С. Микрорентгеноспектральные исследования рабочих поверхностей электродов после электроискрового легирования металлических поверхностей. // Электронная обработка материалов 1978, №4. С.20-23.

28. Верхотуров А.Д., Муха И.М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. К.: Техника, 1982.- 181с.

29. Взоров. Б.А., Моргулис Ю.В., Поветкин Г.М. Современные тенденции в развитии систем турбонаддува и промежуточного охлаждения и их применение в тракторных дизелях. Обзорная информация. Серия. Тракторы, самоходные шасси и двигатели, агрегаты и узлы. Вып. 7. ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш, 1980.46 с.

30. Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. Ю.Н. Васильев и др. М.: Недра, 1987. 197с.

31. Власов М.В. Повышение долговечности пластинчатых гидронасосов восстановлением изношенных рабочих поверхностей методом электроискровой обработки. Кандидатская диссертация,- Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 2003. 216 с.

32. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность) Учебник. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МСХА, 2000.- 616 с.

33. Гончаренко А.А. Повышение долговечности угольных комбайнов методом электроискрового восстановления изношенных деталей. — Автореф. дисс. на соиск. ученой степени к.т.н. — Днепропетровск, Горный ин — т. им. Артёма, 1966, 17с.

34. ГОСТ 23.224-86. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. Издательство стандартов, 1886.-28 С. 155.

35. Гохфельд Д.А., Кононов Н.М., Сухов Е.И. Исследование вибрации лопаток рабочих колес турбин турбокомпрессора ТКР-11//Тракторы и сельскохозяйственные машины, №1, 1965.- С.18-21.

36. Григорьев И.В., Рогачев В.М. Об устойчивости и колебаниях сложных роторных систем с подшипниками скольжения / Колебания и динамическая прочность элементов машин. М.: Машиностроение, 1976. С. 88-98.

37. Григорьев М.А. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1983. 148 с.

38. Грузинцев А.П. Восстановление чугунных блоков цилиндров двигателей комбинированными покрытиями. Кандидатская диссертация. Саранск: МГУ им. Н.Н. Огарева, 2002. 137 с.

39. Гуревич В.М., Бондаренко В.И. Свойства поднимаемой машинами пыли- // Механизация и электрификация сельского хозяйства; №2, 1976; СМ..

40. Гусак Я.М., Цигельник Г.И. Усталостные разрушения колес центробежных турбин У/ Энергомашиностроение, №2, 1966. 18 с.

41. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей.,3-е изд. перераб. и доп. / Под; ред. А.С. Орлина. - М.: Машиностроение, 1971. 400 с.

42. Диденко А.М. Дизели СМД. Справочник. - М.; Агропромиздат, 1990. 272 с.

43. Дунаев П.Ф. Размерные цепи. - М.: МАШГИЗ, 1963. 307 с.

44. Иванов В.И. Влияние технологических режимов электроискрового легирования и материала электрода на некоторые параметры рельефа поверхности. // Электронная обработка материалов, 1998- №№ 3А 303 с.

45. Иванов Г.П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. М.: Машгиз, 1961. 156 с.

46. Игнатенко Э.Л., Верхотуров А.Д., Маркин М.З. Формирование поверхностного слоя при электроискровом легировании легкоплавкими металлами. // Электронная обработка материалов, 1979, №3. - С.26-29.

47. Икрамов У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа. М.: Машиностроение, 1987. -281 с.

48. Ионов П.А. Выбор оптимальных, режимов восстановления изношенных деталей электроискровой наплавкой. Кандидатская диссертация. - Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 1999. 216 с.

49. Исследование надежности дизелей и уточнение: структуры ремонтного цикла / Отчет о НИР. Рук. работы к.т.н. Кривенко П.М. ГОСНИТИ, 1981, ВНИТЦ, Инв. № 02822037

50. Исследования покрытий деталей нанесенных электроискровым методом. Заключительный отчет о НИР / Рук. Работы Бурумкулов Ф.Х. Г.Р.01.9.900000312. Инв.№02.99.0006307. М.: ВНИИТУВИД «Ремдеталь», 1999.-II с.

51.Кацев П.Г. Статистические методы исследования: режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1974. 231с.

52. Кильмяшкин Е. Кандидатская диссертация. - Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 2001, 216 с.

53. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации, - М.: Машиностроение, 1974. 259 с.

54. Колбасин А.А. Восстановление и повышение надежности узла трения турбокомпрессора семейства СМД. Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. технич. наук. - Харьков, 1988. - 18 с.

55. Колбасин А.А.. Разработка и применение технологии восстановления электроискровым легированием изношенных валов турбокомпрессоров / Технология повышения долговечности восстановленных деталей. Сб. научн.ст.- М., 1985, С.38-43. 157

56. Котин А.В. Восстановление размерных цепей при ремонте сборочных единиц машин. - Саранск: Издательство «Рузаевский печатник», 1998.-148 с.

57. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.



58. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: Справочник, - М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

59. Кузнецов Д.В. Повышение надежности цилиндропоршневой группы автотракторных двигателей. Кандидатская диссертация, Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 1999. 184 с.

60. Кучин В.Д., Оздобин И.И., Щастова А.К. Экспериментальная проверка физической модели механизма электрической эрозии материалов. // Электронная обработка материалов, 1973, №5, с. 9-11.

61. Назаренко Б.Р. Электроискровая обработка токопроводящих материалов, -М.: Изд-во АН СССР, 1959, 184 с.

62. Назаренко Н.И. Современный уровень и перспективы развития электроискрового легирования металлических поверхностей. // Электронная обработка металлов, 1967, № 5, с. 46-48

63. Назаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 45 с.

64. Лезин П.П. Основы надежности сельскохозяйственной техники. - Саранск, Изд-во Мордов. ун-та; 1997. 223 с.

65. Лельчук Л.М., Фридман А.С. Оценка долговечности восстановленных валов тракторных дизелей // Надежность и контроль качества. №7, 1984, С. 24-27.

66. Леонидас Дуилис Рамос Родригес. Восстановление бронзовых втулок пластической деформацией с электроконтактной приваркой стальной ленты. Дисс. на соиск. уч. ст. к. т. н. -М.: МАДИ-ВНИИТУВИД «Ремдеталь», 1996. С. 157-158

67. Методические рекомендации по ремонту турбокомпрессоров тракторных и комбайновых дизелей. Москва: Центр научно-технической информации, пропаганды и рекламы, 1986. 64 с.

68. Методические указания по оценке, прогнозированию и нормированию ресурса и безотказности сельскохозяйственной техники. - М.: ГОСНИИ, 1975. 271 с.

79. Михайлюк А.И. Влияние электроискрового легирования металлических поверхностей на их износостойкость, - Автореф. дисс. на соиск. ученой степени к.т.н. - Москва, 1990. 15 с.

70. Михайлин В.Н., Носов В. И. //Техника в сельском хозяйстве, №7, 1984, С.51.

71. Панченко Е.В, Спаков Ю.А., Кример Б.И. и др. Лаборатория металлографии. - М.: Металлургия, 1965. 440 с.

72. Петров г Ю.Н. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Изд-во: Кишинев, 1985. 196 с.

73. Пилянкевич А.П. и др. Электронно-микроскопическое исследование структуры упрочненных слоев при электроискровом легировании титанового сплава алюминием // Электронная обработка материалов, 1979, №5. С.40-42.

74. Писаренко Т.П. и др. Прочностные характеристики слоев, полученных электроискровым легированием сталей тугоплавкими металлами // Проблемы прочности: Сб.науч.ст. - М, 1973, №2. С 109-109.

75. Поляченко А.В. Исследование электроискрового упрочнения как способа повышения износостойкости тракторов при ремонте. Кандидатская диссертация. - Москва, ВНИИ 1953. 160 с.

76. Пушкин И.А. Восстановление изношенных деталей из бронз способом электроискровой наплавки электродами из медных сплавов и никеля. Кандидатская диссертация; - Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 2001. 242 с.

77. Раков Н.В: Технология и средства восстановления деталей, гидрораспределителей с плоскими золотниками методом электроискровой обработки. Кандидатская диссертация. Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 2003. 240 с.

78. РД 50-690-89. Методические указания Надёжность в технике. Методы оценки показателей надёжности по экспериментальным данным.

79. РД 70.0009.002.86. Определение нормативов надёжности и: износостойкости восстановленных деталей. М.: ГОСНИТИ, 1986. 32 с.

80. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: «Зинатне», 1975. 210 с.

81. Сабеев К.Г., Попович Ю.И., Семиченко В.Е. и др. Восстановление подшипника ротора турбокомпрессора //Механизация и электрификация сельского хозяйства, №11, 1989. 32 с.

82. Самсонов Г.В., Верхогуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычёв В.С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. - Киев: Наукова думка, 1976. 219с.

83. Сафронов И.И. Исследование возможности применения карбидных и боридных соединений титана, ниобия, циркония и хрома в качестве электродов для электроискрового легирования: Автореф. дисс. К., 1967. 30 с.

84. Сенин П.В. Повышение: надежности мобильной сельскохозяйственной техники при ее необезличенном ремонте. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2000. 124 с.

85. Сенин П.В. Повышение надежности мобильной сельскохозяйственной техники при её необезличенном, ремонте. Докторская диссертация. - Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 1999. 216 с.

86. Симеон А.Э., Каминский В.Н., Моргулис Ю.Б. и др. Турбонаддув высокооборотных дизелей. М.: Машиностроение, 1976. 286 с. 160

87. Слысь И.Г. и др. Применение дисперсно-упрочненных сплавов на основе хрома в качестве электродов при электроискровом; легировании.// Электронная обработка материалов, 1979, №4. С.32-35.

88. Степанов А.Г. Технология и средства повышения долговечности коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания: оптимальным использованием ремонтного припуска. Докторская диссертация. - Саранск, 2003. 505 с.

89. Сульдин С.Ф. Повышение долговечности шестеренных насосов восстановлением и упрочнением изношенных поверхностей деталей электроискровой обработкой. Кандидатская диссертация. - Саранск, 2004. 195 с.

90. Тельпов А. С. Расчет числа запасных элементов при нормальном законе их наработки до замены // Механизация и электрификация сельского хозяйства. №5, 1976. С.45-47. 91. Трение, изнашивание и смазка: Справочник.

В 2-х кн./ Под редакцией И.В.Крагельского и В.В.Адисина.-М.; Машиностроение, 1978.-Кн. 1. 400 с.

92. Турбокомпрессоры тракторных и комбайновых дизелей. Технические требования на: капитальный ремонт. ТК 10-05;0001.003 86. Москва: ГОСНИТИ, 1988. 65 с.

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

94. Фурсов С.П. Некоторые вопросы чистового электроискрового легирования. // Электронная обработка материалов, 1976, №5. С. 19-27.

95. Халфин М.А. Определение межремонтных сроков службы машин в сельском хозяйстве. М.: Колос. 239 с.

96. Хлебникова Е.А. Восстановление вала ротора турбокомпрессора электроконтактным напеканием металлических порошков / 161  
Механизированные способы ремонта и восстановления деталей сельскохозяйственных машин: Сб. науч. трудов. - Челябинск, 1989. С. 9-11.

97. Хрулев А.Э. Ремонт двигателей зарубежных автомобилей. - М.: Изд-во «За рулем», 1999. 439 с.

98. Чатынян Д. А., Назаренко Н.И. Повышение износостойкости поверхностей трения, работающих при высоких температурах, электроискровым легированием. // Электронная обработка металлов, 1966, № 2, С.33-38.

99. Черноivanов В.И., Бледных В.В., Северный А.Э., Ольховацкий А.К. и др. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: Учебное пособие / Под ред. В.И. Черноivanова.- Москва-Челябинск: ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2001. 831 с.

# НУБІП України

100. Шмидт В., Шпаков В. Оценка технического состояния турбокомпрессора трактора К-700 без разборки. // Техника в сельском хозяйстве, №6, 1974. С.67-69.

# НУБІП України

101. Шмидт В.П. Исследование и обоснование диагностических параметров подшипников скольжения турбокомпрессора трактора К-700 / Науч. тр. ГОСНИТИ, т. 41. - М.: ГОСНИТИ, 1973. С. 89-96.

102. Шор Я.Б., Кузьмин Ф.И. Таблицы для: анализа и контроля надежности.- «Советское радио», 1968. 288 с.

# НУБІП України

103. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В., Иванов В.И., Величко С.А., Ионов П. А. - Саранск: Тип. «Крас. Окт.», 2003. 504 с.

104: Krauze H., Schoelkamp C. Suvestigation into the Reaction of Metallic Bodies in Tribological System. Wear. Vol; 81, №2, 1982.

# НУБІП України

105. Moore D.F. Abrasive wear in agricultural machinery. Tribologi, №1, 1975. - P. 33-35.

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

НУБІ! ПІРАЯ  
УКРАЇНИ

НУБІ! ПІРАЯ  
УКРАЇНИ

НУБІ! ПІРАЯ  
УКРАЇНИ

НУБІ! ПІРАЯ  
УКРАЇНИ

НУБІ! ПІРАЯ  
УКРАЇНИ

НУБІ! ПІРАЯ  
УКРАЇНИ

НУБІ! ПІРАЯ  
УКРАЇНИ