

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

Фізико-технічний, інженерно – фізичний факультет

(повне найменування інституту, факультету)

Фізичне матеріалознавство

(повне найменування кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проєкту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему : «Порівняльні дослідження різних методів нанесення
ущільнювальних покриттів на статорні деталі турбін газотурбінних двигунів»

Виконав: студент 2 курсу, групи ІФ-232м

Спеціальності 132 Матеріалознавство(код і

найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

ПАПІЙ О.С._____

(прізвище та ініціали)

Керівник ВІНІЧЕНКО В.С. к.т.н., доц._____

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

2023

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний факультет
 Кафедра Фізичного матеріалознавства
 Ступінь вищої освіти Магістр
 Спеціальність 132 «Матеріалознавство»
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«__» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

_____ ПАПЯОЛЕКСАНДРА СЕРГІЙОВИЧА
 (ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Порівняльні дослідження різних методів нанесення ущільнювальних покриттів на статорні деталі турбінгазотурбінних двигунів»

керівник проєкту (роботи) Вініченко Валерій Степанович доц. кафедри ФМ,
 (науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «__» _____ 20__ року №__

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 07.12.2023

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) ущільнюючі покриття, зразки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз чинників, що впливають на ефективність газотурбінних двигунів 2. Методика, технологія виготовлення і нанесення основних типових ущільнювальних покриттів в турбінах ГТД 3. Порівняльні дослідження покриттів та методи їх нанесення 4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях 5. Економічне обґрунтування

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Турбіна компресора турбогвинтового двигуна сімейства МС-500В, Схематичне зображення процесу термічного напилення та становище струменю при термічному напиленні, Хімічний склад матеріалів ущільнювальних покриттів, які наносяться на статорні деталі турбін ГТД

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконання завдання
1	ВІНІЧЕНКО В.С.		
2	ВІНІЧЕНКО В.С.		
3	ВІНІЧЕНКО В.С.		
4	НЕСТЕРОВ О.В.		
5	КРУГЛІКОВА В.В.		
6	ФАСОЛЬ Є.О.		

7. Дата видачі завдання «10» жовтня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1.	Аналіз чинників, що впливають на ефективність газотурбінних двигунів	15.10.2023	
2.	Методика, технологія виготовлення і нанесення основних типових ущільнювальних покриттів в турбінах ГТД	20.10.2023	
3.	Порівняльні дослідження покриттів та методи їх нанесення	10.11.2023	
4.	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	09.11.2023	
5.	Економічне обґрунтування	16.11.2023	

Студент(ка)

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Олександр ПАПІЙ

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Валерій ВІНІЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 100с., 25 табл., 21 рис., 29 джерел.

ПОКРИТТЯ, ТУРБІНА, НАПИЛЕННЯ, ККД, НАНЕСЕННЯ, КОМПРЕСОР, ГРАФІТ, УЩІЛЬНЕННЯ.

В дипломному проєкті розглянуті такі поняття, як газотурбінний двигун (ГТД), турбіна ГТД, основні їх параметри та особливості роботи, матеріали.

Також розглянуто вплив різних факторів на ККД турбіни ГТД та вплив радіальних зазорів на ККД турбіни і витрату палива двигуна.

Більш детально описана сутність методу термічного напилення, основні методи нанесення ущілювальних покриттів (плазмовий, газополум'яний, метод надзвукового напилення (HVOF)), зроблені їх порівняльні дослідження, вказані переваги та недоліки кожного з них. Описані самі покриття, які використовуються в турбінах вітчизняних ГТД (АНБ, КНА, 20Б, АЛК, термографіт-тальк, М-427.25, Л63 (латунь)) та технологія їх отримання. Сформульовані висновки щодо оптимального ущілювального покриття та способу його нанесення.

ЗМІСТ

С.

Вступ.....	6
Аналіз чинників, що впливають на ефективність газотурбінних двигунів.....	7
1.1 Особливості роботи турбіни ГТД.....	7
1.2 Вплив різних факторів на ККД турбіни.....	10
1.3 Вплив радіальних зазорів на ККД турбіни і витрату палива.....	12
2. Методика, технологія виготовлення і нанесення основних типових ущільнювальних покриттів в турбінах ГТД.....	18
2.1 Основні види ущільнювальних покриттів, що використовуються в турбінах вітчизняних ГТД.....	24
2.2 Методи нанесення ущільнювальних покриттів для підвищення ККД турбіни та зниження питомої витрати палива ГТД.....	46
3. Порівняльні дослідження покриттів та методи їх нанесення.....	56
3.1 Вибір типу ущільнювального покриття.....	56
3.2 Вибір методу нанесення покриття.....	59
3.3 Можливі дефекти при нанесенні покриттів.....	63
4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	70
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	70
4.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки.....	71
4.3 Заходи щодо виробничої санітарії та гігієни праці.....	74
4.4 Заходи з пожежної безпеки.....	76
4.5 Заходи безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	78
5. Економічне обґрунтування.....	82
5.1 Виробництво ущільнювальних покриттів.....	82
5.2 Техніко-економічні розрахунки.....	83
Висновки.....	96
Перелік джерел посилань.....	98

ВСТУП

При виробництві авіаційних двигунів особливу увагу завжди приділяють підвищенню їх коефіцієнта корисної дії (ККД) і, відповідно, зниженню витрат палива. Для цього використовують різні підходи (конструкторські, технологічні, матеріалознавчі) і частиною таких заходів є застосування ущільнювальних покриттів. Оскільки величина радіального зазору між ротором та статором значно впливає на ККД турбіни, його зменшення дозволяє вирішити дану проблему найбільш ефективно. Величина зазору має бути постійною впродовж всього міжремонтного періоду роботи газотурбінного двигуна (ГТД). Однак, в процесі експлуатації, можливі ситуації зіткнення ротору і статору, що може призводити до виходу з ладу двигуна. Тому, для забезпечення необхідного розміру зазорів найбільш доцільно застосовувати ущільнювальні покриття різного складу, в залежності від умов роботи конструктивних вузлів авіаційного двигуна. Такі покриття під час взаємодії ротору та статору мають легко припрацьовуватись для запобігання виникненню аварійних ситуацій, які пов'язані з зіткненням конструктивних елементів двигуна.

Покриття, що застосовують в турбінах, мають відповідати ряду суперечливих вимог. З одного боку, має бути забезпечена аерозійна стійкість в умовах дії агресивного високотемпературного газового середовища і, водночас, низька робота врізання покриття, щоб під час дотику лопаток алоабіринтів з покриттям не відбувався знос апаратування деталей турбіни. Також потрібно забезпечити високу жаростійкість. Іншою проблемою є забезпечення високої адгезії між матеріалом основи та покриттям впродовж всього міжремонтного періоду експлуатації двигуна.

Метою даної роботи був аналіз умов роботи турбін ГТД, аналіз ущільнювальних покриттів, що застосовуються в турбінах на даний час, та порівняння основних методів їх нанесення.

1 АНАЛІЗ ЧИННИКІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГТД

1.1 Особливості роботи турбіни ГТД

Газотурбінний двигун (ГТД) – тепловий двигун, в якому газ стискається інагрівається, а потім енергія стисненого інагрітого газу перетворюється у механічну роботу на валу газової турбіни.

На відміну від поршневого двигуна, в ГТД процеси відбуваються в потоці рухомого газу.

Стиснуте атмосферне повітря з компресора надходить в камеру згоряння, куди також подається паливо, яке, згоряючи, утворює велику кількість газоподібних продуктів згоряння під високим тиском. Потім в газовій турбіні енергія тиску продуктів згоряння перетворюється на механічну роботу за рахунок обертання лопаток, частина якої витрачається на стиснення повітря в компресорі. Інша частина роботи передається на привідний агрегат. Робота, споживана цим агрегатом, і вважається корисною роботою двигуна. Газотурбінні двигуни мають найбільшу питому потужність серед двигунів внутрішнього згоряння, до 6 кВт/кг.

Як паливо може використовуватися будь-яке пальне, яке можна диспергувати: бензин, гас (керосин), дизельне паливо, мазут, природний газ, суднове паливо, водяний газ, спирт і подрібнене вугілля.

Турбіна ГТД – вузол ГТД, призначений для перетворення енергії газу у роботу на валу, витрачаєму на привід компресора двигуна і, в залежності від призначення ГТД, інших пристроїв (повітряний гвинт, несучий гвинт, допоміжні агрегати).

Застосовуються, в основному, одно- та багатоступеневі осьові турбіни, рідше радіальні або діагональні доцентрові турбіни.

В осьовій турбіні газовий потік паралельний осі обертання, в радіальній турбіні – спрямований вздовж радіусу. Радіальні газові турбіни застосовуються при відносно малих витратах газу.

Ступінь турбіни складається із соплового апарату, встановленого в корпусі, робочих лопаток, закріплених на диску ротора та ущільнювальних елементів[1].

До турбіни пред'являються високі вимоги по ефективності, надійності роботи, габаритам та вазі. Турбіна працює у широкому діапазоні зміни параметрів газу і частоти обертання ротора. Вимагається зберігання високої ефективності турбіни при зміні режимів роботи. Ефективність роботи турбіни характеризується трьома ККД: ізоентропічним (відношення дійсного теплоперепаду в турбіні до наявного ізоентропічного теплоперепаду), ефективним або потужнісним (відношення отриманої механічної роботи до того ж ізоентропічного теплоперепаду), ККД у параметрах загальмованого потоку (відношення отриманої роботи до ізоентропічного теплоперепаду, визначеному за параметрами загальмованого потоку за турбіною). В газодинамічних розрахунках турбіни для оцінки ефективності її роботи найчастіше використовується останній ККД. В охолоджувальних турбінах ККД визначається з урахуванням енергії охолоджувального повітря.

Для отримання високих значень ККД повинні бути оптимізовані кінематичні параметри ступені (ступень реактивності і співвідношення між окружною швидкістю ротору та швидкістю газового потоку) і газодинамічні параметри лопаткових венців, а також зведені до мінімуму втрати від перетікання газу в радіальному зазорі між лопатками ротору і корпусами турбіни. Зменшення втрат у радіальному зазорі досягається застосуванням бандажних полиць з лабіринтними гребінцями на кінцях лопаток або зменшення зазору до мінімальних значень, при яких дозволяється дотик

лопаток о корпус на деяких режимах роботи турбіни у разі застосування стираємих вкладишів на внутрішній поверхні корпусу.

Бандажування робочого колеса зазвичай виконується на лопатках з відносно великим подовженням (відношення довжини лопатки до її хорди). Бандажні полки використовуються також для зниження вібраційних напружень, рівень яких тим більше, чим довші лопатки. При відносно коротких лопатках (відношення діаметру турбіни до довжини лопатки більше 10) важливе значення мають зменшення радіального зазору і його зберігання на мінімальному рівні на усіх режимах роботи турбіни. Для цього застосовується теплове регулювання зазору шляхом програмної зміни температури корпусу і ротору турбіни.

У сучасних турбінах досягається високий рівень ККД в параметрах загальмованого потоку (90% та 93% для одно- і багатоступеневих турбін відповідно).

Вибір кількості ступенів турбіни залежить від призначення двигуна, його кінематичної схеми та параметрів. Для приводу компресору газогенератора використовуються одно- і двоступеневі турбіни, для приводу вентилятора при великому ступені двухконтурності двигуна чи повітряного гвинта – багатоступеневі турбіни (до 6 ступенів). При відносно малій ступені двухконтурності для приводу використовуються одно- чи двухступеневі турбіни. Важливими показниками турбіни є питомі значення потужності і ваги: потужності, отримуємої від 1 кг витрачаємого газу, і ваги конструкції турбіни, віднесеної до вироблюваної потужності. Підвищення температури газу, збільшення швидкості газового потоку і окружної швидкості ротору призводять до збільшення питомої потужності турбіни та зниженню її питомої ваги. Температура газу досягає 1600-1700 К, окружна швидкість ротору – 500 м/с, швидкості газового потоку у високоперепадних одноступеневих турбінах біля або надзвукові.

Високі температури газу в турбінах засвоєні завдяки застосуванню жароміцних та жаростійких ливарних сплавів і інтенсивного повітряного

охолодження омиваємих газом поверхонь. Подальше удосконалення турбін пов'язане з підвищенням температури газу, застосуванням більш жароміцних і жаростійких матеріалів, включаючи композиційні матеріали, і теплозахисних покриттів, більш удосконалених схем охолодження двигунів, оснований на використанні прогресивних технологічних методів виготовлення лопаток, корпусів, дисків [2].

На рисунку 1.1 зображена турбіна компресора турбогвинтового двигуна сімейства МС-500В розробки АТ «МОТОР СІЧ».

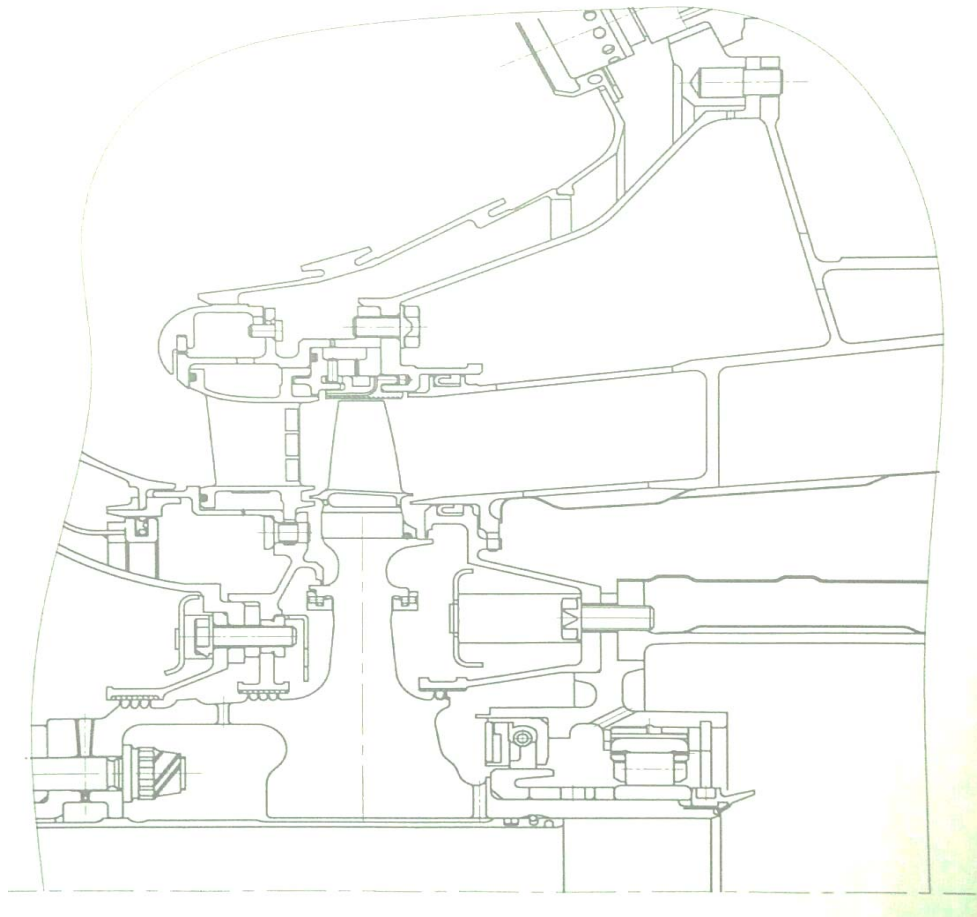


Рисунок 1.1 – Турбіна компресора турбогвинтового двигуна сімейства МС-500В[3]

Як видно з рисунку 1.1, у внутрішніх полостях турбіни компресора розташовані лабіринтні ущільнення (3 місця). В данному випадку на статорних деталях застосовано покриття АНБ.

1.2 Вплив різних факторів на ККД турбіни

Газодинамічна досконалість турбіни ГТД визначається її ККД, від значення якого залежить паливна економічність двигуна.

ККД – це відношення корисної роботи до кількості тепла, витраченого на створення цієї роботи. В сучасних турбінах ГТД ККД складає $0,9 \dots 0,93$.

На параметри турбіни, зокрема на ККД, впливає багато факторів, таких як температура газу на вході, витрата охолоджуючого газу через турбіну, радіальні зазори, площі мінімального прохідного перетину соплових апаратів, частота обертання роторів, плавність газоповітряного тракту (присутність або відсутність зустрічних уступів), герметичність проточного тракту, прямолінійність кромek лопаток, шорсткість трактових елементів, тощо.

Зменшення питомої витрати палива і одночасно зростаюча надійність ГТД є ключовими і пріоритетними напрямками розвитку сучасного авіаційного двигунобудування.

В процесі експлуатації шорсткість поверхонь лопаток турбін суттєво погіршується внаслідок корозії і ерозії, що тягне за собою збільшення профільних втрат і, як наслідок, погіршення параметрів турбіни і двигуна в цілому.

Шорсткість турбінних лопаток сильно впливає на аеродинамічну ефективність і теплове навантаження лопаток. Потенційно втрати кінетичної енергії за рахунок шорсткості можуть збільшитися в 4 рази, а коефіцієнт тепловіддачі к профілю до 2,5 раз [17].

Застосування різноманітних теплозахисних покриттів лопаток турбін на основі нікелевого сплаву допомагає захистити поверхні від високотемпературної корозії і розміцнення в результаті впливу високих

температур, крім того, знижує температуру металу лопаток та підвищує їх ресурс. На перехідних режимах роботи двигуна теплозахисні покриття вирівнюють температуру поверхонь лопаток і знижують термічні напруження в них [1].

Приклад впливу зміни різних параметрів двигуна на його основні характеристики наведений у таблиці 1 малих відхилень (див. нижче).

Таблиця 1.1 -Малі відхилення при $N_b = \text{const}$ для турбогвинтового двигуна МС-500В-02С (розробка АТ «МОТОР СІЧ») [24]

	$\Delta\eta_k = -1\%$	$\Delta\eta_{TK} = -1\%$	$\Delta\eta_{CT} = -1\%$	$\Delta A_{TK} = -1\%$	$\Delta A_{BT} = -1\%$	$\Delta \alpha_{VX} = -1\%$	$\Delta \alpha_{\text{межтурбдиф}} = -1\%$
$\Delta C_{уд}, \text{кг/л.с./час}$	+0,003	+0,003	+0,002	-0,001	0,000	+0,001	+0,002
$\Delta \eta_{TK}, \%$	-0,2	-0,3	+0,2	+0,3	-0,3	+0,3	-0,2
$\Delta G_k, \text{кг/с}$	-0,029	-0,034	+0,011	+0,010	-0,027	-0,012	-0,020
$\Delta P^*_{к}, \text{кг/см}^2$	-0,03	-0,06	+0,05	+0,11	-0,07	-0,01	-0,03
$\Delta t^*_{KT-8}, ^\circ\text{C}$	+11	+13	+4	-4	+4	+4	+8

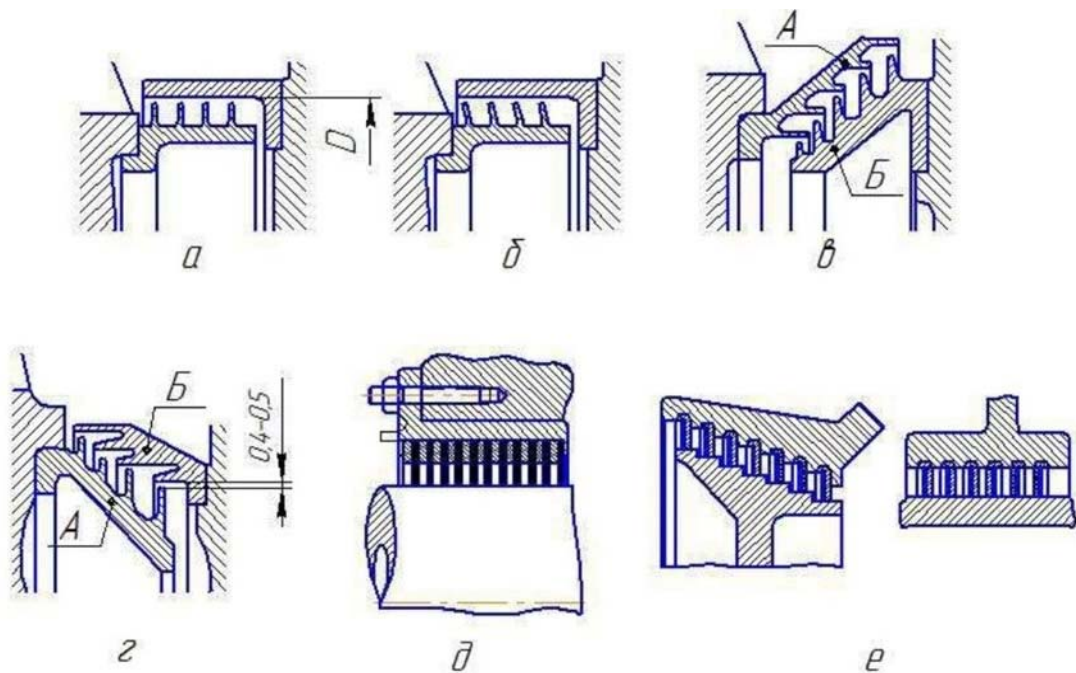
Тобто з таблиці 1 можемо бачити, що, наприклад, при зменшенні площі проходного перетину апарату соплового ТК ΔA_{TK} на 1 % питома витрата палива Суд зменшиться на 0,001 %, але обороти ротора турбіни компресора η_{TK} збільшаться на 0,3 % і т.д.

1.3 Вплив радіальних зазорів на ККД турбіни і витрату палива

При наявності високих колових швидкостей та значних перепадів тиску в турбінах використовуються лабіринтні ущільнення. Їх ефективність залежить від числа та конфігурації гребінців і величини радіального зазору.

Одним із видів втрат, що знижують ККД турбіни та економічність двигуна в цілому, є втрата повітря. В лабіринтних ущільненнях на шляху повітря, що перетікає, виникає великий гідравлічний опір. Зі зменшенням радіального зазору між гребінцями та нерухомою (статорною) деталлю та зі збільшенням числа гребінців, гідравлічний опір збільшується і об'єм повітря, що перетікає, зменшується.

Різновиди лабіринтних ущільнень наведені на рисунку 1.2.



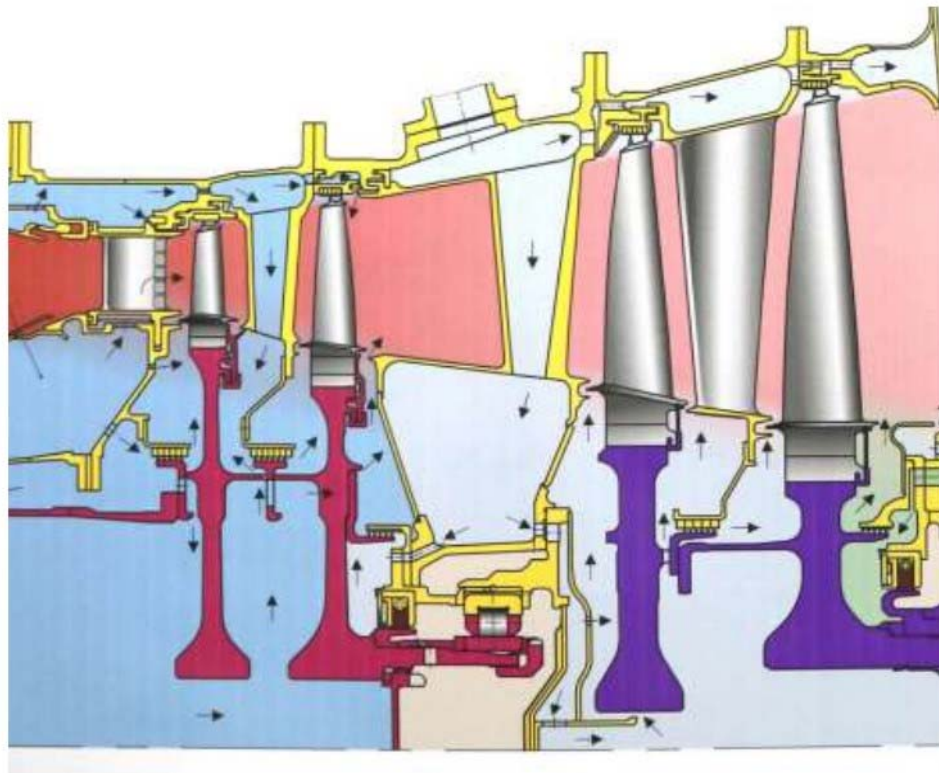
а – з прямими гребінцями; б – з гребінцями, які розташовані під кутом до осі обертання; в,г – з гребінцями, які розташовані на конічних поверхнях (деталь А – обертається, деталь Б- нерухова); д,е – із штампових дисків

Рисунок 1.2 – Повітряні лабіринтні ущільнення

З рисунку 1.2 випливає те, що найпростішим є ущільнення, що показане на рисунку 1.2, а. Розташування гребінців під кутом (рисунок 1.2, б), з нахилом назустріч потоку дещо підвищують ефективність ущільнення. При розташуванні гребінців такого ущільнення на конічній поверхні до

ефекту дроселювання додаються втрати від зміни напрямку потоку повітря, що сприяє зменшенню перетікання повітря (рисунок 1.2, в, г, д, е) [9]. Як сказано вище, зменшення радіального зазору підвищує ефективність лабіринтного ущільнення. Але слід враховувати, що при малих зазорах можливий контакт гребінців зі статорними кільцями, велике зношення, ушкодження та нагрівання.

На рисунку 1.3 зображена схема охолодження турбіни ГТД сімейства ТВ3-117.



На рисунку 1.3 видно, що у конструкції турбіни компресора і вільної турбіни ГТД сімейства ТВ3-117 лабіринтні ущільнення застосовують як з метою мінімізації перетікання газу між ступенями, так і з метою ущільнення масляних порожнин.

Радіальні зазори між ротором та статором турбіни необхідні для нормальної роботи і здійснюють значний вплив на її ефективність. Цей вплив

збільшується при збільшенні як абсолютного, так і відносного (по відношенню до довжини лопатки) значення радіального зазору.

Знос кінцевої (торцевої) поверхні робочої лопатки ТВТ є основною причиною збільшення радіального зазору між ротором і статором. Знос ротору (який може мати місце на одному з перехідних режимів) призводить до збільшення робочого зазору, зниження ККД, збільшення витрати палива на усіх інших – в тому числі основних робочих – режимах двигуна. Знос корпусу найчастіше буває місцевим (обумовленим неідеальною формою деталі) і зазвичай не має таких значних наслідків для ефективності турбіни.

Основними причинами зносу торця робочої лопатки є тертя (врізання в корпус) і ерозійний знос. Ерозійний знос торця лопаток (а також і корпусних проставок/вставок над цими лопатками) в процесі експлуатації стає головною причиною неконтрольованого збільшення радіального зазору для першої (і певною мірою – в другій) ступені ТВТ.

Більш масивні або маючі меншу інтенсивність тепловіддачі деталі (наприклад, диски) нагріваються і остигають повільніше, а деталі з меншою масою чи з більшим коефіцієнтом тепловіддачі – швидше (наприклад, корпус).

Як показує аналіз, зміни розмірів деталей під час роботи викликані в основному впливом температури. Вплив відцентрових навантажень (для ротору) в декілька разів менш значний.

Корпус являє собою швидко реагуючу на зміну режиму двигуна тонку оболонку і зазвичай достатньо швидко змінює свою температуру (і, відповідно, розмір) при зміні температури потоку газу в проточній частині. Ротор являє собою масивну (за рахунок дисків) конструкцію, до того ж яка знаходиться переважно в середовищі охолоджуємого повітря (яке значно повільніше газу реагує на зміну режиму двигуна). Тому теплова інерційність ротору значно вища. При збільшенні режиму відставання ротору призводить до збільшення радіального зазору, а при зменшенні (скиданні) режиму – до його зменшення.

Багато в цих процесах залежить від темпу зміни режиму двигуна і співвідношення теплової інерційності ротору і корпусу. При недостатньому радіальному зазорі в складанні або несприятливому поєднанні теплової інерційності ротору і статору може виникнути контакт та недопустимий знос як при скиданні режиму, так і при швидкому збільшенні режиму (наприклад, на зльоті).

На першому етапі проектування повинен бути визначений мінімальний радіальний зазор, який забезпечує виключення врізання роторних деталей (у першу чергу робочих лопаток) в корпус. На наступних стадіях проектування врізання ротору в корпус, особливо в стільникові ущільнення і вставки, що прироблюються, може бути визнано допустимим і навіть необхідним після детального моделювання радіальних зазорів в робочому циклі.

Мінімальний зазор повинен враховувати (для прикладу взята турбіна авіаційного двоконтурного двигуна тягою біля 20 тон) наступні фактори:

- виробничі допуски на виготовлення деталей турбіни і ексцентриситет (відхилення від ідеального кола) ротору. Зміна зазору по цій причині може скласти 0,15...0,40 мм (менша величина відноситься до ТВТ, більша – до ТНТ, фізичні розміри якої зазвичай більші). Така величина зазору забезпечує складання конструкції;
- згин ротору при роботі за рахунок номінальних (допустимих) значень дисбалансу. Зміна зазору по цій причині може скласти 0,05...0,15 мм;
- маневрені навантаження на корпуси і ротори, які призводять до деформації деталей і вимагають додаткового зазору, необхідного для сумісної роботи деталей в двигуні. Цей додатковий зазор досягає на злітному режимі 0,05...0,10 мм, в декілька разів менше на крейсерському режимі, а на малому газу незначно малий;
- можливість запуску двигуна через 1...2 години після виключення з урахуванням ефекту термічного згину ротору. Цей згин має місце через діаметральний термічний градієнт (накопичення залишившигося в роторних

деталях тепла у верхній частині турбіни). Термічний згин ротору може призвести до тимчасового заклинення роторів ТВТ і ТНТ (на декілька годин) приблизно через годину після виключення. Для виключення ефекту термічного згину може знадобитися додаткове збільшення радіального зазору на 0,5 мм і більше [17].

Отже, одним з методів підвищення ККД турбіни зокрема та двигуна в цілому і зниження витрати палива є застосування ущільнювальних покриттів. Виходячи з умов роботи турбіни, вимогами до таких покриттів є:

- прироблюваність контактуючих елементів;
- достатня міцність, але значно нижче міцності роторних деталей (лопаток);
- невисокий коефіцієнт тертя, знижуючий знос в процесі контактування;
- стабільність ущільнення протягом усього періоду роботи двигуна [1].

2 МЕТОДИКА, ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ І НАНЕСЕННЯ ОСНОВНИХ ТИПОВИХ УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ В ТУРБІНАХ ГТД

Термічне напилення – це група або сімейство процесів, в яких деяке концентроване джерело тепла використовується для розплавлення вихідних матеріалів. В той же час їм надається кінетична енергія за допомогою струменів технологічного газу для переносу розплавлених часток до підготовленої поверхні, що покривається. Коли гарячі частки і частки, які володіють високою енергією, ударяються об поверхню деталі, що покривається, вони швидко тверднуть. По мірі того, як усі нові частки падають на поверхню, товщина покриття зростає. Ключовий момент для процесу – це джерело тепла і засоби, які використовуються для розгону часток. Пристрої термічного напилення зазвичай називаються пістолетами або пальниками.

Ущільнювальне покриття в турбіні – це шар певного матеріалу, нанесений на статорні елементи турбіни з метою підвищення її ККД та зниження питомої витрати палива [4].

Для зниження витрати палива та підвищення ККД турбіни необхідно застосовувати покриття у вигляді опрацьовуваних ущільнень. Це дозволяє зменшити до мінімальних радіальні зазори між елементами статору і ротору газового тракту турбіни. Критично мінімальний зазор не забезпечує надійну роботу. З багатьох причин (зокрема, із-за різниці коефіцієнтів лінійного розширення) при дотику торців лопаток до статорної частини конструкції можливе їх заклинювання, злам, і як наслідок, виведення з ладу двигуна. У зв'язку з цим на статорній поверхні турбіни передбачають жорстко пов'язане ущільнення, що прироблюється яке запобігає злому лопатки в моменти дотику [9].

На рисунку 2.1 схематично зображений процес термічного напилення.

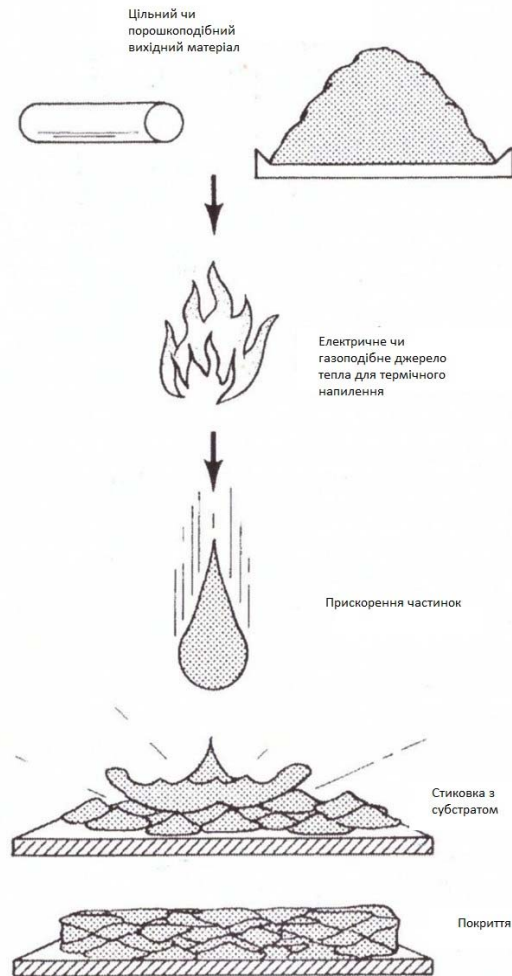
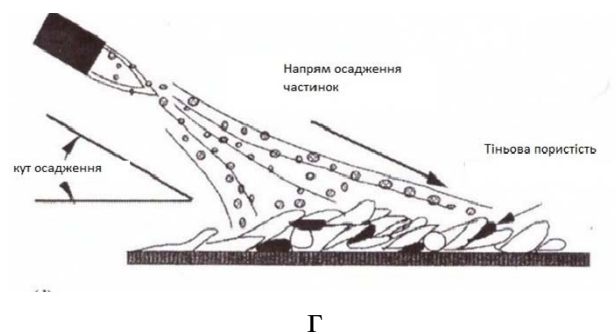
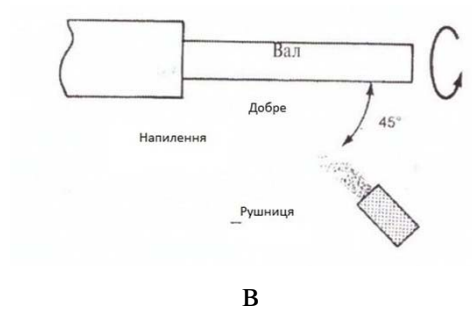
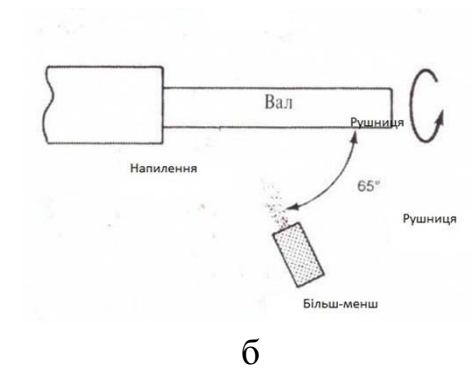
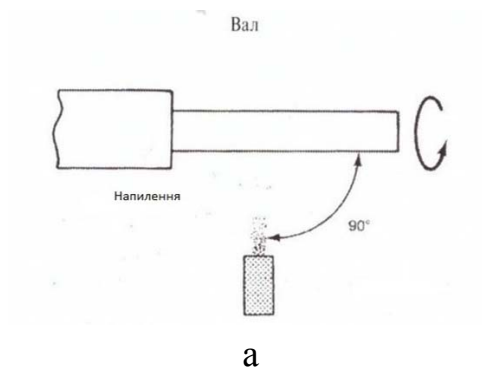


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення процесу термічного напилення

Покриття термічного напилення мають унікальну мікроструктурну архітектуру. Покриття формуються по мірі того, як розплавлені і частково розплавлені частки різних розмірів падають на субстрат з інтенсивністю, можливо, мільйону часток в секунду і нашаровуються одна на одну, як це показано на рисунку 2.1.

Можливе становище струменю при термічному напиленні зображено на рисунку 2.2.



а –добре; б –прийнятне; в -мінімально прийнятне.

г - формування пор в напилюваних покриттях, коли кут напилення зменшений до приблизно 45° .

Рисунок 2.2 – Становище струменю при термічному напиленні

Рисунок 2.3 – Типовий процес термічного напилення і результуюче покриття

На рисунку 2.3 бачимо частки, що ударяються в підготовлену поверхню, і нарощують ламелярну структуру, характерну для процесу термічного напилення.

На рисунку 2.4 зображені параметри і змінні величини типового процесу термічного напилення.

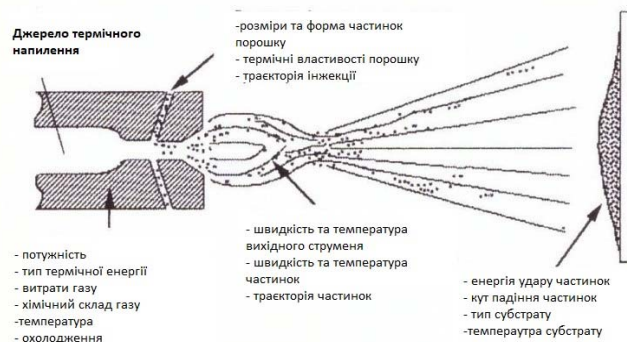


Рисунок 2.4 – Параметри і змінні величини типового процесу термічного напилення

Рисунок 2.4 дає схематичне уявлення порошкового процесу напилення, яке підкреслює основні характеристики процесу, які впливають на якість покриття. Зі спрощеної точки зору, цей процес може бути представлений як високошвидкісна термічна обробка (розглянута в контексті часу, температури і маси), метою якої є доведення маси порошку до необхідної температури за заданий період часу. Час, який частка знаходиться в обробній струмені, називається часом затримки. Він визначається швидкістю газу і характеристиками часток порошку. В свою чергу швидкість газу визначається загальною витратою газу через форсунку / сопло, характеристиками газу, а також енергією, що діє на процес або виробляється в результаті процесу. Таким чином, швидкість часток є функція від

швидкості потоку, разом з характеристиками часток – їх розмірами, морфологією і масою. Отже, температурою деякої заданої частки є функція від ентальпії, швидкості, траєкторії і її власних фізичних та термічних властивостей [4].

Температура газу в потоці напilenня широко варіюється як функція від параметрів процесу. В процесах газополум'яного напilenня температура встановлюється належним чином через характеристики палива, відношення кисню або повітря до палива і тиском у зоні горіння.

Температура і швидкість значно варіюються в межах струменю, що визначається декількома факторами. Найголовніший з них – це різниця в температурі між гарячим ядром струменю і його відносно холодним оточенням. Струмені плазми обмежуються анодами / форсунками з водяним охолодженням. У процесах, наведених у дію полум'ям, здебільшого використовуються охолоджувані повітрям пристрої, працюючі в умовах довкілля. Падіння температури між ядром струменю і кордоном між форсункою і довкіллям зазвичай становить декілька тисяч градусів на декількох міліметрах. Таке падіння температури викликає відповідне падіння швидкості газу і підвищення в'язкості газу по напрямленню до зовнішніх кордонів. Коли газ виходить з форсунки, то його температура і швидкість теж падають, так що спостерігаються як радіальний, так і осьовий градієнти температури, швидкості і в'язкості газу. До цієї важкої картини розподілу додається ще й розподіл порошку.

Матеріал ущільнення, що прироблюється, повинен забезпечувати:

- прироблюваність контактуючих елементів;
- достатню міцність, але значно нижче міцності роторних деталей (лопаток);
- невисокий коефіцієнт тертя, знижуючий знос в процесі контактування;
- стабільність ущільнення протягом усього періоду роботи двигуна [5].

Проаналізуємо основні види ущільнювальних покриттів та методи їх нанесення з метою вибору найбільш оптимального та економічно вигідного.

2.1 Основні види ущільнювальних покриттів, що використовуються в вітчизняних турбінах ГТД

Основними ущільнювальними покриттями, які використовують в турбінах вітчизняних ГТД, є АНБ, КНА, 20Б, АЛК, термографіт-тальк, М-427.25, Л63 (латунь).

В роботі використовували матеріали, хімічний склад яких наведено в таблицях 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5. Хімічний склад матеріалів КНА і М-427.25 наведено у таблицях 3.1, 3.2 відповідно.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад покриття АНБ

Найменування матеріалу	Нітрид бору, %	Двуокісь кремнію, %	Алюміній	Робоча температура, °С
АНБ	13-19	4-8	Основа	600

Таблиця 2.2 – Хімічний склад покриття 20Б

Найменування матеріалу	Нітрид бору, %	Графіт, %	Мідь, %	Нікель	Робоча температура, °С
20Б	13-16,5	9-11	21-24	Основа	700

Таблиця 2.3 – Хімічний склад матеріалу АЛК

Найменування матеріалу	Нітрид бору, %	Алюміній, %	Робоча температура, °С
АЛК	40-45	55-60	600

Таблиця 2.4 – Склад покриття термографіт-тальк

Найменування матеріалу	Клей ВК-2, г	Графіт ГАК-2, г	Тальк, г	Робоча температура, ° С
Термографіт-тальк	100	12	8	350

Таблиця 2.5 – Хімічний склад покриття Л63 (латунь)

Найменування матеріалу	Мідь, %	Цинк, %	Робоча температура, ° С
Л63 (латунь)	62-65	35-38	550

1) Ущільнювальний матеріал АНБ. Ущільнювальний матеріал АНБ наноситься методом плазмового напилення гранульованої суміші металічних порошків і твердого мастила.

Ущільнювальний матеріал АНБ призначений для зменшення радіальних зазорів деталей газотурбінних двигунів, працюючих при температурі не вище 600°C. Застосовується при серійному виробництві і ремонті.

Для нанесення ущільнювального матеріалу АНБ застосовуються універсальні плазмові установки типу УПУ. У якості плазмоутворюючої середовища застосовується суміш аргону з азотом.

Дозатори, які використовуються при напиленні, повинні забезпечувати рівномірну подачу порошку і плавне регулювання витрати.

Оснащення, яке використовується при піскоструйній обробці та напиленні, повинно надійно захищати поверхні, не підлягаючі напиленню,

від попадання електрокорунду та покриття, а також забезпечувати демонтаж без пошкодження напиленого шару.

Усі застосовувані матеріали дозволяється брати в роботу при наявності сертифікату або ярлику на відповідність нормативним документам:

- порошок алюмінієвий сферичний дисперсний марок АСД-0, АСД-1 (ТУ 48-5-226);
- розпорошений алюмінієвий порошок марки ULT 02565 (по сертифікату);
- нитрид бору гексагональний марки А (ТУ У 26.8-00222226-007);
- рідке скло натрієве А, Б (ГОСТ 13078);
- порошок високолегованих сталей і сплавів марки ВКНА (ТУ 14-1-1790);
- порошок композиційний терморезаючий для газотермічного напилення марки ПГ-Ю5Н (ТУ 14-22-76);
- електрокорунд марок 14А, 15А, 13А, F40, F54, F22...30, F20, №32...40, 63...80, 80...100 (ГОСТ 3647, ТУ У 26.8-00222226-016);
- азот газоподібний (ГОСТ 9293);
- аргон газоподібний (ГОСТ 10157).

Приготування шихти виконували шляхом механічного змішування порошків у співвідношенні:

- алюміній 75 ± 1 %;
- нитрид бору 25 ± 1 %.

Змішування порошків відбувалося у змішувачі з ексцентричною віссю обертання з додаванням металевих вугolkів з нержавіючої сталі в кількості 20...25 % від маси змішуваних компонентів. Час змішування порошків 10...12 годин. Змішувач заповнили порошками на 1/3 об'єму. Швидкість обертання змішувача 40...60 об/хв.

Готову суміш зберігали у щільно закритій тарі.

Сушу суміш порошків ретельно змішували з рідким склом до отримання рівномірно зволоженої маси. На 1 кг суміші порошків взяли 150...170 см³ рідкого скла з питомою вагою 1,45...1,50 г/см³.

Сиру суміш засипали на вібраційне сито, протерли через сито 1,0, потім через сито 0,4 (дозволяється також через сито 0,2). Існує ручний та механізований спосіб приготування шихти.

Отримані гранули шихти просушили при температурі 150±10 °С 8...10 годин в коробках з нержавіючої сталі. Висушену шихту просіяли через сито 0315 (при просіюванні дозволяється використання металічних або керамічних шарів).

Перед операцією обдівки електрокорундом виконали термічне знежирення деталей при температурі 300±50 °С 1...2 години з послідовним оглядом при ультрафіолетовому опроміненні на відсутність слідів масла. Блакитне свічення не дозволяється.

Поверхні деталей під напилення ущільнювального матеріалу обдують електрокорундом зернистістю 14А, 15А, 13А, F40...F54, №32...40. Обдута поверхня повинна бути рівномірно матовою, без темних та світлих плям.

Проміжок часу між закінченням обдівки електрокорундом і нанесенням ущільнювального матеріалу не повинен бути більше 2 годин. Перерва між нанесенням підслою ВКНА і покриттям АНБ не більше 30 хвилин.

Примітка:

- необхідну робочу напругу встановлюють зміною витрати азоту;
- режими напилення конкретно для кожної деталі відпрацьовують на зразках та вказують в технологічних картах;
- дозволяється у якості підслою використовувати порошок марки ПГ-Ю5Н.

Не підлягаючі покриттю поверхні повинні бути закриті пристосуванням.

Перед нанесенням на деталь перевірили твердість ущільнювального матеріалу АНБ на зразку-свідку.

Підслої ВКНА і матеріал АНБ наносили плазмовим напиленням на установці УПУ-3Д.

Прогріли напиляємою поверхню горілкою без подачі порошку протягом 2...3 проходів плазмотрону.

Шихта ущільнювального матеріалу АНБ повинна відповідати нормам хімічного і ситового аналізів.

Відбір проби для хімічного і ситового аналізів відбувався в процесі просіву шихти шляхом змішування 3-х проб вагою по 50...70 г, узятих на початку, всередині та в кінці просіву.

Ситовий аналіз проводився за допомогою прибору для визначення зернового складу моделі 026 з набором сит.

Гранулометричний склад шихти повинен відповідати слідуючим нормам:

- сито 0315 – залишок не більше 10%;
- сито 005 – прохід не більше 8 %.

Хімічний склад шихти повинен відповідати нормам:

- нитрид бору – 18...25 %;
- двоокись кремнію 4...8 %;
- алюміній – основа.

На матеріалі АНБ після нанесення та механічної обробки не дозволяються продольні (кільцеві) тріщини, сколи, рихлоти, відслоювання, сторонні вclusions.

Після механічної обробки дозволяються окремі групові поперечні тріщини, викрашування розміром 3 на 3 мм глибиною до 0,5 мм згідно з еталоном.

Товщина слою ущільнювального матеріалу АНБ повинна бути отримана з урахуванням мінімального припуску на механічну обробку, але не більше 3 мм.

Хімічний склад ущільнювального матеріалу АНБ визначався після напилення на зразках-свідках.

Твердість матеріалу АНБ - 7...15 НВ 5/62, 5/60.

При виявленні дефектів після механічної обробки матеріал АНБ разом з підслоєм повністю видаляється механічним або хімічним способом і технологічний процес повторюється.

Видалення матеріалу АНБ хімічним способом відбувається у лужному розчині зі змістом їдкого натрію або їдкого калію 200...400 г/л, після чого підслою ВКНА або ПГ-Ю5Н видаляється механічним способом або обдувкою електрокорундом.

Примітка – не дозволяється видалення матеріалу АНБ хімічним способом з деталей з алюмінієвих сплавів.

2) Ущільнювальний матеріал КНА. Ущільнювальний матеріал КНА наноситься як газополум'яним, так і плазмовим способом.

Ущільнювальний матеріал КНА призначений для зменшення радіальних зазорів деталей газотурбінних двигунів, працюючих при температурі не вище 900°C.

Товщина ущільнювального матеріалу КНА виконується в залежності від умов роботи деталей і складальних одиниць, їх функціонального призначення та визначається креслеником. Товщина матеріалу після напилення не повинна бути більше 3 мм.

Деталі, які поступають на напилення, повинні бути без масла, емульсії, бруду. Деталі, що напиляються, повинні зберігатися і транспортуватися у чистій тарі, оберігатися від ушкоджень.

Для приготування механічної суміші (шихти) для плазмового напилення просіяли порошки нікелю, кремнію через сито 010, графіту через сито з сіткою 025 по ГОСТ 6613-86, порошок карбаміду через сито 1,0.

Приготування суміші здійснювали шляхом механічного змішування у співвідношенні по масі: 97,5...98,0 % нікелю, 2,0...2,5 % кремнію, 10 % сечовини зверху 100 % суміші.

Змішування порошків відбувалося в змішувачі з ексцентричною віссю обертання з додаванням «жучків» в кількості 30 % від ваги змішуваних компонентів протягом 8 годин.

Відпал суміші здійснювали в середі дисоційованого аміаку при температурі 950 °C протягом 4...4,5 годин.

Змішана суміш повинна бути однорідного сірого кольору у виді брикету. Відпалену суміш подрібнили, просіяли через сито 010. В подрібнену суміш (85 %) додали нітрид бору (12 %), графіт (2 %), алюміній (1 %).

Хімічний склад шихти повинен бути:

- нітрид бору 7...13 %;
- графіт 1,5...2,5 %;
- алюміній 0,3...1,2 %;
- кремній 1,4...2,5 % в спеченій суміші;
- нікель – решта.

Виготовлена шихта повинна зберігатись в закритій тарі не більше 30 днів. По закінченню терміну шихту просушити при температурі 100...150 °C протягом 1,5...2,0 годин. На тарі повинна бути відповіднабірка.

Приготування стрижневої суміші для газополум'яного наплення здійснювали шляхом механічного змішування порошкової суміші (шихти) з силікатом натрію у співвідношенні: порошкова суміш – 1000 г, силікат натрію – 240 г.

Стрижні отрималивидавленням стрижневої маси у пресформі через філ'єру діаметром 4,5 мм.

Довжина стрижнів 400-600 мм. Видавлені стрижні уклали в спеціальні листи.

Сушку стрижнів здійснювали послідовно: витримали на повітрі не менше 4-х годин. При 50^{+10} °C протягом 30...60 хв., 70^{+10} °C протягом 30...60 хв., 100^{+10} °C – 30...60 хв., 200 ± 10 °C протягом 2,5...3 годин.

Охолодження відбувалося з шафою до температури 60...70 °C.

Контроль стрижнів здійснювали візуально. Дозволяються поздовжні розшарування. Придатні стрижні уклали в жорсткі тубуси (з відповідними етикетками). Термін зберігання стрижнів – 2 місяці. По закінченню терміну стрижні просушують.

Підготування поверхні деталі під нанесення матеріалу КНА здійснювали обдувкою електрокорундом зернистістю 32-40 по ГОСТ 3647-80 або ТУ У 26.8-00222226-016 при тиску повітря 4...6 кгс/см², діаметрі сопла 16...22 мм, дистанції обдувки 100^{+20} мм. Після обдувки абразивом деталь очистили від пилу сухим стисненим повітрям при тиску 3...4 кгс/см².

Деталі, які не мають нарізки різьблення, обдувають електрокорундом зернистістю №63...100 по ГОСТ 3647 або електрокорундом зернистістю F30, F24, F22, F20 по ТУ У 26.8-00222226-016.

Поверхня деталі, підготовлена для нанесення покриття, має бути рівномірно матовою, без темних і світлих плям.

Контроль підготування поверхні здійснювали за контрольним зразком.

Нанесення підслою і матеріалу КНА газополум'яним способом. Нанесення підслою здійснювали на спеціальних установках газополум'яного напилення згідно з технологічним процесом.

Проволоку ЭИ435 попередньо знежирили у ванні травлення.

Для напилення використовували гази:

- кисень в балонах технічний ГОСТ 5583-78;
- ацетилен в балонах ГОСТ 5457-75;

- осушене стисле повітря від заводської сітки.

На опіскоструменну поверхню не дозволяється попадання вологи, масла, бруду. Час між закінченням обдувки і початком нанесення підслою не повинен бути більше 2 годин. У разі перевищення цього часу операція обдувки повторюється.

Підслой і матеріал КНА у виді стрижнів наносилигазополум'яним розпилом по наступним режимам:

- тиск ацетилену 0,8...1,2 атм.;
- тиск кисню 4,0...5,0 атм.;
- тиск розпилюючого повітря 4,0...5,5 атм.;
- швидкість обертання деталі (лінійна) 2...8 м/хв.;
- швидкість подачі стрижнів 350...450 мм/хв.;
- відстань від напиляємої поверхні до сопла горілки 80...100 мм.

Товщина підслою була забезпечена технологічно (1-3 оберти деталі).

Перед нанесенням матеріалу КНА на деталь визначили твердість матеріалу, напиленого на зразок-свідок, котра була 15...25 НВ. Замір твердості по Брінелю виконували при навантаженні 62,5 кг і діаметрі кульки 5 мм по ГОСТ 9012.

При появі в процесі напилення не проплавлених часток їх слід удаляти з поверхні деталі гострим інструментом (шабером і ін.) згідно технологічному процесу.

Для приготування гранул шихти для нанесення КНА плазмовим способом суміш порошків (див. приготування вище) змішали з силікатом натрію у співвідношенні 1000 г суміші та 150 г силікату натрію.

Змішування відбувалося в лопатовому змішувачі протягом 10...30 хв. до отримання рівномірно зволоженої маси.

Вологу суміш засипали на вібросито, просіяли через сито 1,0, потім через сито 040.

Отримані гранули шихти просушили при температурі 150 ± 10 °C протягом 1,5...2 годин.

Висушену шихту просіяли через сито 0315.

Гранулометричний склад визначили за допомогою ситового аналізу приладом для визначення зернового складу (модель 026) по ГОСТ 18318-94 з набором сит по ГОСТ 3984-73.

Гранулометричний склад шихти повинен відповідати нормам:

- при просіві через сито 0056 повинно проходити не більше 8 %;
- залишок на ситі 0315 не повинен бути більше 10 %.

Гранульована шихта зберігається у закритій тарі не більше 30 днів (з відповідною етикеткою).

Нанесення підслою і матеріалу КНА плазмовим способом. Нанесення підслою здійснювали на плазмовій установці згідно технологічному процесу.

Для напilenня використовували гази:

- аргон газоподібний ГОСТ 10157-79;
- азот газоподібний ГОСТ 9293-74.

Підслой наносили товщиною 0,1...0,15 мм з порошків високолегованих сталей і сплавів марки ВКНА по ТУ 14-1-1790-76. Товщина підслою була забезпечена технологічно за 1...3 оберти деталі.

Режими нанесення підслою:

- відстань до напиляємої поверхні 100...120 мм;
- струм 400...450 А;
- напруга 40...50 В;
- витрата аргону: 45 л/хв. (робоча), 30 л/хв. (початкова), 4,5...5,5 л/хв. (на порошок);
- витрата азоту 3...8 л/хв.;
- витрата порошку 1,3...1,7 кг/год.;
- тиск аргону $3^{+0,5}$ кгс/см²;
- тиск азоту $3^{+0,5}$ кгс/см²;

- швидкість переміщення напиляємої поверхні 2000...15000 мм/хв.;

- швидкість переміщення плазмотрону 10...30 мм/хв.

Перед нанесенням матеріалу КНА на деталь визначили твердість матеріалу на зразку-свідку, яка була 15...25 НВ (5/62, 5/60).

Контроль якості матеріалу КНА після напилення відбувався на деталях та зразках-свідках.

Усі деталі підлягали візуальному огляду. На напиленій поверхні не повинно бути тріщин, розшарувань, не проплавлених часток. Зовнішній вигляд покриття після механічної обробки повинен відповідати контрольному зразку.

Контроль товщини слою матеріалу виконувався вимірювальним інструментом на деталі у 3-х довільно обраних точках (шляхом замірів поверхні деталі до і після напилення).

У разі виявлення дефектів після мех. обробки, а також при ремонті, матеріал КНА знімається механічним способом до металевої поверхні і знову наноситься згідно технологічному процесу.

Твердість матеріалу КНА - 15...25 НВ 5/62, 5/60.

Колір і шорсткість покриття – шорстка поверхня світло-сірого кольору.

Щільність: 3,3...3,7 г/см³.

Пористість: 22...26 %.

Застосовувані товщини: 1,5...2,0 мм.

Межа міцності при згинанні: 5...10 кгс/мм².

Коефіцієнт термічного розширення, 1/°C

$\alpha \times 10^{-6} (20-1000 \text{ } ^\circ\text{C})$: 20...100 - 8,0; 100...200 - 8,2; 200...300 - 14,3; 300...400 - 14,3; 400...500 - 14,3; 500...600 - 16,3; 600...700 - 16,3; 700...800 - 16,3; 800...900 - 16,3; 900...1000 - 16,3.

На рисунку 2.5 зображена проставка апарату соплового ТК з нанесеним матеріалом КНА.

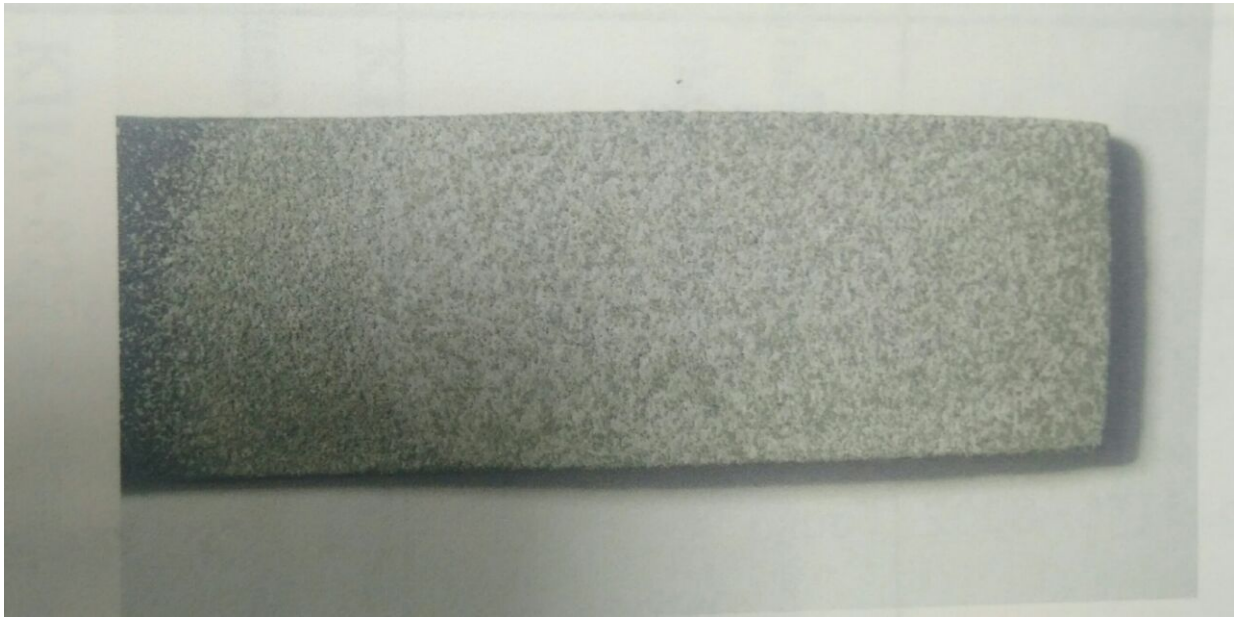


Рисунок 2.5 – Проставка СА ТК з нанесеним матеріалом КНА

2) Ущільнювальний матеріал 20Б. Нанесення ущільнювального матеріалу 20Б виконується методом газополум'яного стрижневого напилення і плазмовим методом.

Ущільнювальний матеріал 20Б використовується для зменшення радіальних зазорів в проточній частині турбіни. Робоча температура – до 700°C.

Товщина ущільнювального матеріалу 20Б виконується в залежності від умов роботи деталей і складальних одиниць, їх функціонального призначення і не повинна перевищувати 3 мм.

Деталі, поступаючи на напилення, повинні бути чистими, без слідів масла, емульсії, бруду. Напиляемі деталі повинні зберігатися та транспортуватися у чистій тарі, оберігатися від ушкоджень.

Виготовлення механічної суміші порошків (шихти) для газополум'яного і плазмового напилення. Для цього були просіяні порошки нікелю, міді через сито 010 і графіту через сито 025 по ГОСТ 6613-86, порошок карбаміду через сито 1,0 по ГОСТ 6613-86.

Приготування суміші здійснювалося шляхом механічного змішування порошків у співвідношенні: нікель – 70 %, мідь - 30 %, 10 % сечовини зверху 100 % суміші. Змішування порошків виконувалося у змішувачі з ексцентричною віссю обертання з додаванням металевих «жучків» розміром $20 \times 20 \times 2$ мм в кількості 10-20 % від ваги змішуваних компонентів протягом 5-6 годин.

Відпал суміші виконувався у середовищі дисоційованого аміаку при температурі 760 ± 20 °C протягом 3 годин. Загрузка муфеля до печі здійснювалася при температурі 500 ± 20 °C (витримка 1,5...2 години).

Відпалена суміш була однорідного сірого кольору у виді брикету. Її подрібнили, просіяли через сито 010. В подрібнену суміш (73 %) додали нітрид бору (13...16 %), графіт (11 %). Змішували порошки у змішувачі з ексцентричною віссю з додаванням «жучків» (10...20 % від ваги шихти) протягом 10...12 годин.

Хімічний склад шихти повинен бути у відсотках: нітрид бору 13...16,5 %, графіт 9...11 %, мідь 21...24 %, нікель – інше.

При невідповідності хімічного складу шихти дозволяється коректування з додатковим змішуванням протягом 4...6 годин, з проведенням повторного хімічного аналізу.

Виготовлена шихта повинна зберігатися у закритій тарі не більше 30 днів з відповідною етикеткою.

Приготування стрижневої суміші і стрижнів для газополум'яного напилення. Приготування стрижневої суміші здійснювалося шляхом механічного змішування порошкової суміші (шихти) з силікатом натрію в процентному співвідношенні: порошкова суміш 74...76 %, силікат натрію 24...26 %.

Дозволяється при виготовленні стрижневої суміші вводити до 20 % відходів стрижнів, не використаних в процесі напилення. Стрижнева суміш

до загрузки у пресформу повинна зберігатися у перхлорвініловій плівці. Термін зберігання – не більше 72 годин.

Виготовлення стрижнів здійснювалося видавленням стрижневої маси у пресформі через філ'єру діаметром $4,5 \pm 0,1$ мм на гідравлічному пресі. Довжина стрижнів 400...600 мм. Видавлені стрижні були укладені у спеціальні листи.

Сушка стрижнів здійснювалася послідовно: витримка на повітрі не менше 4-х годин, потім в сушилі при температурах 50^{+10} °C протягом 30...60 хвилин, 70^{+10} °C протягом 30...60 хвилин, 100^{+10} °C протягом 30...60 хвилин, 200^{+10} °C протягом 2,5...3,0 годин. Охолодження здійснювалося із шафою до температури 60...70 °C.

Контроль стрижнів виконувався візуально. Тріщини, раковини не дозволяються. Скривлені кінці були обламані. Придатні стрижні уклали у жорсткі тубуси до 5...10 кг в кожний (з відповідною етикеткою).

Перед операцією обдувки електрокорундом здійснювали термічне знежирення деталей при температурі 300^{+50} °C протягом 1...2 години з наступним оглядом при ультрафіолетовому опроміненні на відсутність слідів масла. Блакитне світіння не дозволяється. При наявності слідів масла операцію повторюють.

Підготування поверхні деталей під напилення здійснювали обдувкою електрокорундом зернистістю 32...40 по ГОСТ 3647-80 або ТУ У 26.8-00222226-016 при тиску повітря 3...4 кгс/см², діаметрі сопла 16...22 мм, дистанції обдувки 100^{+20} мм. Після обдувки деталь очистили від пилу сухим стисненим повітрям при тиску 3...4 кгс/см².

Поверхня деталей, підготовлена для нанесення покриття, повинна бути рівномірно матовою, без темних і світлих плям. Контроль підготування

виконувався за контрольним зразком. Братися незахищеними руками за обдугі поверхні деталі заборонено.

Деталі без нарізки різьблення дозволяється обдугати електрокорундом зернистістю №63...100 по ГОСТ 3647 чи F30, F24, F22, F20 по ТУ У 26.8-00222226-016.

Нанесення підслою і ущільнювального матеріалу 20Б газополум'яним способом.Проволоку ЕИ-435 попередньо знежирили у ванні травлення.

Для напилення застосовували гази:

- кисень технічний в балонах (ГОСТ 5583-78);
- ацетилен в балонах (ГОСТ 5457-75);
- осушене стиснене повітря.

На обдугу поверхню не дозволяється попадання вологи, масла та інших забруднень.

Час між закінченням обдугки і початком нанесення підслою не повинен перевищувати 2 годин. У разі перевищення цього часу операцію обдугки необхідно повторити.

Після закріплення деталей в пристосуванні для напилення поверхню під напилення обдуги сухим стисненим повітрям.

Підслой нанесли товщиною 0,1...0,15 мм з проволоки ЕИ-435 по

ТУ 14-1-997-74 по режиму: тиск ацетилена – 0,8...1,2 атм., тиск кисню – 4...5 атм., тиск розпиляючого повітря – 4...5,5 атм., швидкість подачі проволоки – 350...450 мм/хв., лінійна швидкість деталі – 2...8 м/хв., відстань від напилюємої поверхні до сопла горілки – 80...100 мм (для деталей з діаметром поверхні більше 100 мм), 110...120 мм (для деталей з діаметром поверхні менше 100 мм).

Перед нанесенням ущільнювального матеріалу на деталь визначили твердість матеріалу на зразку-свідку, яка була 7...15 НВ (5/62, 5/60).

Ущільнювальний матеріал у виді стрижнів наносилигазополум'яним розпиленням по слідуючим режимам:

- тиск ацетилена 0,8...1,2 атм.;

- тиск кисню 4...5 атм.;
- тиск розпилюємого повітря 4...5,5 атм.;
- швидкість подачі стрижнів 350...450 мм/хв.;
- лінійна швидкість деталі 2...8 м/хв.;
- відстань від напиляємої поверхні до сопла горілки 80...100 мм.

При виявленні у процесі напилення непропавлених часток слід удаляти їх з поверхні деталі гострим інструментом (шабером і ін.) згідно технологічному процесу.

Приготування гранул шихти для нанесення ущільнювального матеріалу плазмовим способом. Суміш порошків (див. приготування вище) змішали з силікатом натрію у співвідношенні: 1000 г порошкової суміші на 150 г силікату натрію. Змішування здійснювалося в лопатевому змішувачі протягом 10...30 хв. до отримання рівномірно зволоженої маси.

Вологу суміш засипали на вібросито, просіяли через сито 1,0, потім через сито 040. Отримані гранули шихти просушили при температурі 150 ± 10 °C протягом 1,5...2 годин. Висушену шихту просіяли через сито 0315.

Гранулометричний склад був визначений за допомогою ситового аналізу приладом для визначення зернового складу (модель 026) по ГОСТ 18318-94 з набором сит по ГОСТ 3984-73.

Гранулометричний склад шихти повинен відповідати слідуючим нормам:

- при просіві через сито 0056 повинно проходити не більше 8 %;
- залишок на ситі 0315 не повинен перевищувати 10 %.

Гранульована шихта зберігається у закритій тарі не більше 30 днів (зі спеціальною етикеткою).

Нанесення підслою і ущільнювального матеріалу 20Б плазмовим способом. Для напилення використовували гази: аргон газоподібний ГОСТ 10157-79 та азот газоподібний ГОСТ 9293-74.

Підслої наносили товщиною 0,1...0,15 мм з порошків високолегованих сталей і сплавів марки ВКНА по ТУ 14-1-1790-76. Товщина підслою була забезпечена технологічно за 1...3 оберти деталі.

Режими нанесення підслою і ущільнювального матеріалу:

- відстань до напиляємої поверхні 100...120 мм;
- струм 400...450 А;
- напруга 40...50 В;
- витрата аргону: 45 л/хв. (робоча), 30 л/хв. (початкова), 4,5...5,5 л/хв. (на порошок);
- витрата азоту 3...8 л/хв.;
- витрата порошку 1,3...1,7 кг/год.;
- тиск аргону $3^{+0,5}$ кгс/см²;
- тиск азоту $3^{+0,5}$ кгс/см²;
- швидкість переміщення напиляємої поверхні 2000...15000 мм/хв.;
- швидкість переміщення плазмотрону 10...30 мм/хв.

Перед нанесенням ущільнювального покриття на деталь перевірили твердість ущільнювального матеріалу на зразку-свідку, яка була 7...15 НВ (5/62, 5/60).

Контроль якості матеріалу після напилення здійснювали на деталях та зразках-свідках. Був здійснений візуальний огляд всіх деталей. Тріщини, раковини, розшарування, не проплавлені частки не дозволяються. Зовнішній вигляд деталі повинен відповідати контрольному зразку.

Контроль товщини слою виконували вимірювальним інструментом на деталі у 3-х довільно обраних точках.

У разі виявлення будь-яких дефектів, а також при ремонті, матеріал 20Б знімається обдувкою кісточковою крихтою або механічним способом до металевої поверхні, потім знову наноситься згідно технологічному процесу.

Твердість матеріалу 20Б - 7...15 НВ 5/62, 5/60 (замір твердості по Брінелю здійснюється при навантаженні 62,5 кг і діаметрі кульки 5 мм протягом 60 сек. по ГОСТ 9012-59).

3) Ущільнювальний матеріал АЛК. Матеріал АЛК являє собою антифрикційний литий композиційний матеріал, який містить 40...45% по масі твердого мастила із гексагонального нітриду бора в алюмінієвій матриці.

Кільцеві деталі для лабиринтних ущільнень були виготовлені вакуумно-компресійним просочуванням розплавом алюмінія шихти, містящої тверде мастило.

Застосовувані матеріали:

- алюміній А6, А7, А8 (ГОСТ 11069-74) – матриця композиційного матеріалу (КМ);
- порошок гексагонального нітриду бору (ТУ 2.036-707-77) або нітрид бору «АВІО» (ТУ 6-00-05808009-285-93) – наповнювач КМ (тверде мастило);
- порошок алюмінієвий АСД-1 (ТУ 48-5-226-87) або АСД-4 (ТУ 48-107-40-80) – матриця КМ (для покращення пропитки наповнювача);
- окис цинку (ГОСТ 10262-73) – захист поверхонь оснащення від взаємодії з розплавом алюмінія;
- скло натрієве рідке (ГОСТ 13078-81) – зв'язка при виготовленні кілець із АЛК методом пресування.

Виготовлення кільцевих заготовок здійснювалося на установках вакуумно-компресійної пропитки (УВКП) різноманітних модифікацій.

Контроль якості кільцевих заготовок виконувався після попередньої механічної обробки візуальним оглядом на відповідність контрольному зразку з заміром твердості на 100 % заготовок (виконувався на торцях).

Після остаточної механічної обробки (перед обробкою у складальній одиниці внутрішнього діаметра) виконувався остаточний візуальний контроль кільцевих заготовок на відповідність контрольному зразку.

Не дозволяються слідуючі дефекти: тріщини, розшарування матеріалу, наявність не просочених зон, раковини (пори) діаметром більше 1,5 мм.

Дозволяються:

- одиничні раковини (пори) діаметром до 1,5 мм, глибиною до 1 мм в кількості не більше 2-х штук на площі 10 см², з відстанню між дефектами не менше 5 мм як на зовнішній, так і на внутрішній циліндричних поверхнях;
- одиничні раковини (пори) діаметром до 1,5 мм, глибиною до 1 мм, з виходом на кромки кільця в кількості не більше 5 штук з відстанню між ними не менше 5 мм;
- рихлота (скупчення дрібних пор) площею до 1 см² в кількості 2 штук як на зовнішній, так і на внутрішній циліндричних поверхнях. Відстань між дефектами не менше 30 мм;
- прожилки матричного алюмінію товщиною до 1,5 мм протяжністю до 50 мм в кількості не більше 3 штук.

Примітки:

- одиничні раковини (пори) діаметром до 0,3 мм в рахунок врахованих не входять;
- обов'язково оформлюються контрольні зразки;
- по внутрішній циліндричній поверхні кільця по місцям обробки канавок дозволяються сколи до 2 мм, шириною до 0,5 мм, глибиною до 0,2 мм по одному сколу на канавку.

Кільцеві заготовки піддалися технологічному контролю після попередньої механічної обробки. Контроль виконувався на одній заготовці із 50-ти виготовлених.

Визначили твердість матеріалу АЛК по розділу заготовки, рівномірність складу заготовки і якість пропитки первинної порошкової суміші рідким алюмінієм (по мікроструктурі).

Остаточні готові деталі упаковували у поліетиленову плівку і картонну коробку по одній кільцевій заготовці в тарі. Транспортування тільки в тарі.

Деталі повинні зберігатися в сухому опалювальному приміщенні протягом 10 років.

Робоча температура - до 600°C.

Твердість матеріалу АЛК - 25...45 НВ 2,5/31, 25/60.

Розрахункова щільність АЛК- 3,3 г/см³.

Коефіцієнти лінійного розширення АЛК: 35-100°C 14,9, 35-200 ° 14,5, 35-300 °C 14,9, 35-400 °C 15,2, 35-500 °C 15,6, 35-600 °C 15,7.[12].

4) Ущільнювальний матеріал термографіт-тальк. Ущільнювальний матеріал термографіт-тальк використовується для роботи при температурі до 350°C в вузлах лабіринтного ущільнення.

Використовується при серійному виготовленні деталей і ремонті.

Наносився матеріал в ручну шпателем[8].

Приготування матеріалу: Графіт ГАК-2 просушили при температурі 140...170 °C протягом 2-х годин, тальк просушили при температурі 250...300 °C протягом 2...3 годин. Змішування зважених компонентів виконували спочатку вручну, шпателем в емальованому або алюмінієвому посуді, далі у шнековому змішувачі (500...600 об./хв.) протягом 15...20 хвилин.

В'язкість ущільнювальної маси повинна бути 40...55 гр.

Зберігають ущільнювальний матеріал (масу) у закритій тарі, термін зберігання не більше 72 годин.

Безпосередньо перед нанесенням масу ретельно перемішали шпателем.

Примітки:

- протягом 72 годин з моменту приготування загустілу ущільнювальну масу дозволяється розводити спиртом до необхідної в'язкості;

- ущільнювальну масу брати у роботу не раніше 4-х годин після приготування.

Поверхня деталі під покриття повинна мати механічну обробку згідно креслення. Спочатку обдули деталь електрокорундом з осушкою повітря на спеціальній установці. Обдута поверхня повинна бути рівномірно матовою, без темних та світлих плям. Обдувати поверхні можна не більше ніж за 4 години до нанесення ущільнювального матеріалу. Обдуті деталі перед нанесенням термографіт-тальку знежиренню не підлягають.

Підготовлену і підігріту до 75...90 °С поверхню деталі заґрунтовали пензелом, потім шпателем по зразку. Грунт – клей ВК-2. Сушили при температурі 75...90 °С протягом не менше 30 хвилин, але не більше 2-х годин.

Наносили перший шар ущільнювальної маси шляхом рівномірного втирання шпателем по всій поверхні (деталь повинна бути підігріта до 75...90 °С). Шар просушили при 75...90 °С від 30 хвилин до 2 годин. Товщина слою біля 0,3 мм. Збільшення товщини слою характеризується спущуванням і здуттям матеріалу.

Потім повторили операцію до отримання необхідної товщини покриття. Кількість шарів згідно тех. процесу на деталь.

Далі просушили деталь при температурі 100...110 °С протягом 2-х годин і проточили матеріал на необхідні розміри. Витримали деталь у сушці при температурі 100...150 °С протягом 30±15 хвилин. Встановили деталь на токарний станок (підігріли її до 100...150 °С) до розм'якшення покриття, потім прикатали спеціальним роликом на розміри згідно тех. процесу. Просушили деталь по режиму: 130⁺²⁰ °С – 1...1,5 годин, 260⁺²⁰ °С – 2...2,5 годин.

Охолодження проводили у закритій печі до 130 ± 10 °С. Дозволяється привідчиняти двері сушила при працюючій витяжній вентиляції. При цьому швидкість охолодження не повинна перевищувати 50 °С в годину.

Примітки:

- деталь з ущільнювальним матеріалом до кінцевої сушки при температурі 260 ± 20 °С дозволяється зберігати на повітрі не більше 5 діб;
- в процесі нанесення матеріалу, розточки, укладки на сушку не дозволяються удари або деформація деталі;
- в процесі механічної обробки і складання готових деталей не дозволяються удари чи рихтування деталей.

Далі була виконана термічна обробка деталі при температурі 350_{-30} °С протягом 30...60 хвилин. Вимкнули сушило, відчинили двері, деталі винесли на повітря.

Перевірка розмірів ущільнювального матеріалу виконувалася на остиглих деталях. Дозволяються нерівності шару до механічної обробки до 0,5 мм.

Ущільнювальний матеріал повинен бути суцільним без тріщин і сколів. Дозволяється дрібна пористість (пори діаметром не більше 1 мм). На розточеній поверхні дозволяються дрібні пори (до 1 мм у діаметрі).

Деталі з остаточно просушеним ущільнювальним матеріалом були пропитані кремнійорганічною смолою К-2105.

При наявності на поверхні не отверділого ущільнювального матеріалу, здуття або пошкоджень, це місце зачищають шабером, наносять новий матеріал.

При виявленні дефектів на остаточно просушених деталях та після розточки у механічних цехах ущільнювальний матеріал знімається обдуванням кісточковою крихтою, металевим піском або електрокорундом.

Дозволяється знімати ущільнювальний матеріал у розчині їдкого натру 30...40 % [24].

5) Ущільнювальний матеріал М-427.25.

Робоча температура – до 1040°C.

Тип покриття: CoNiCrAlY. Фракція: -45 +25 мкм.

Покриття М-427.25 наноситься методом HVOF (HIGHVELOCITYOXYGENFUEL) – надзвукового напилення. Після напилення покриття рекомендована термообробка [22].

Нещодавно дане покриття було введено на проставки апарату соплового ТК двигуна AI-450 і його модифікацій з метою зменшення виробітки робочих лопаток ротору газогенератора, збільшення ресурсу деталей та покращення параметрів двигуна [24].

Також покриття використовують у якості підслою у термобар'єрних покриттях (наприклад, ТЗП).

Твердість матеріалу М-427.25 – 36...42 HRC.

На рисунку 2.6 зображений зразок проставки апарату соплового ТК двигуна сімейства AI-450 з покриттям М-427.25 (до нарізання канавок).

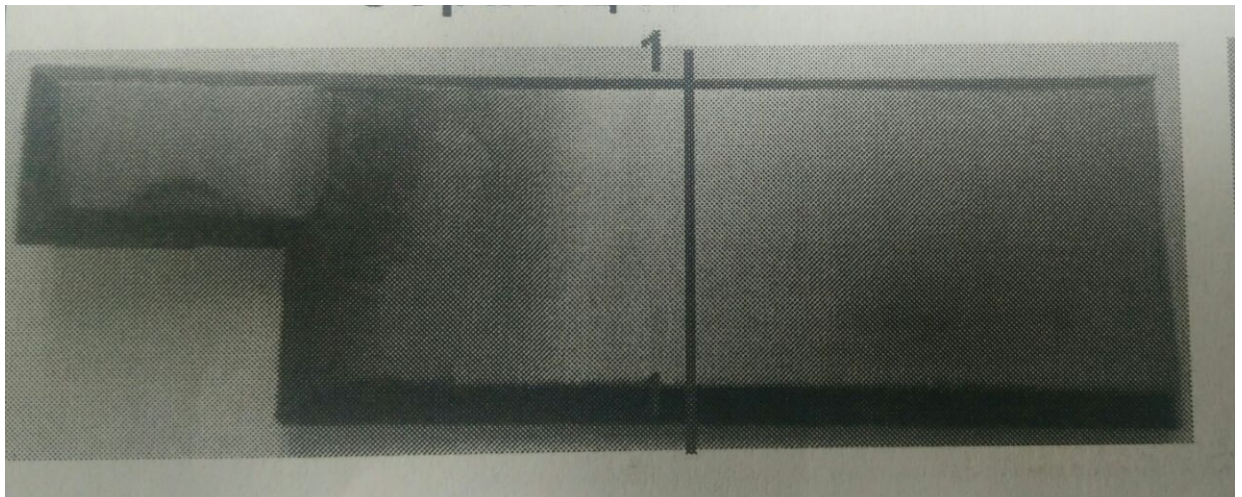


Рисунок 2.6 – Зразок проставки СА ТК з нанесеним покриттям М-427.25 (до нарізання канавок) [24]

На рисунку 2.7 зображені проставки апарату соплового ТК двигуна сімейства АІ-450 з покриттям М-427.25 (з нарізаними канавками, після роботи двигуна).



Рисунок 2.7 – Проставки СА ТК з покриттям М-427.25 (з нарізаними канавками) після роботи [24]

б) Ущільнювальний матеріал Л63 (латунь). Ущільнювальний матеріал Л63 наноситься плазмовим методом, являє собою міцне зносостійке, корозійностійке покриття. У якості підслою використовується порошок ПГ-Ю5Н.

Ущільнювальний матеріал Л63, зазвичай, використовують для ущільнення передмасляних порожнин в корпусах опор турбін.

Твердість матеріалу Л63 - 60...70 НВ [24].

Кожне з наведених ущільнювальних покриттів має свої недоліки і переваги. Так, наприклад, технології створення матеріалу АЛК і нанесення матеріалу термографіт-тальк дуже важкі і проблемні, на відміну від матеріалів АНБ, АЛК, 20Б. Матеріал Л63 досить коштовний. Для нанесення матеріалу М-427.25 методом надзвукового напилення потрібна дуже дорога установка. Матеріал М-427.25 є досить перспективним у використанні, оскільки працює при значних температурах (до 1040 °С), але існують проблеми з технологією його нанесення та механічною обробкою. Тому паралельно з роботами по розвитку і вдосконаленню технології нанесення і

обробки матеріалу М-427.25, можна використовувати матеріал КНА, склад якого дозволяє додавати нові легувальні елементи для підвищення його експлуатаційних характеристик.

2.2 Методи нанесення ущільнювальних покриттів

Основні методи нанесення ущільнювальних покриттів в турбінах ГТД:

- плазмовий;
- газополум'яний;
- метод HVOF (HIGHVELOCITYOXYGENFUEL) - надзвукового напилення [18].

- Плазмовий метод напилення. Плазмове напилення – це один з методів термічного напилення, в процесі якого напиляємий матеріал розпилюється в потоці високотемпературного іонізованого газу – плазмі. Для напилення покриттів використовується «холодна» (низькотемпературна) плазма. Температура плазми на виході з сопла плазмотрону не перевищує 10^4 К.

Сутність плазмового напилення заключається в тому, що в плазмовий потік безперервно з рівномірною швидкістю подається дрібнодисперсний порошок (напиляємий матеріал). При цьому частки порошку захоплюються потоком, нагріваються, плавляться та пришвидшуються у напрямку напиляємої деталі. При зіткненні з напиляємою поверхнею частки порошку, які знаходяться у пластичному стані, деформуються і впроваджуються в мікронерівності підложки, забезпечуючи фізичний контакт з деталлю.

Взаємодія часток порошку з матеріалом підложки, послідує кристалізація часток визначає зчеплення покриття з підложкою. Послідує слої формуються вже за рахунок зв'язку часток одна з одною, мають чашуйчасту будову. Покриття в цілому уявляє собою шаруватий матеріал, що

складається з сильно деформованих напиляємих часток, з'єднаних між собою.

Фізико-механічні властивості покриття. Структура металу відрізняється від вихідного матеріалу. У ній присутні оксиди у вигляді окремих включень і суцільних прошарків, є пори і шлакові включення, межа з'єднання покриття з основним матеріалом чітко окреслена, метал покриття не дифундує в основний метал деталі.

Твердість покриття вище твердості вихідного металу, так як частинки внаслідок швидкого охолодження гартуються і отримують наклеп при ударі об поверхню деталі.

Зносостійкість покриття в умовах сухого тертя низька, так як відбувається не стирання матеріалу, а його руйнування по межах зерен. При терті з мастилом мають високу зносостійкість завдяки підвищеній твердості і пористості покриття.

Механічна міцність покриття незначна, тому не допускаються місцеві динамічні навантаження. Руйнування покриття відбувається тільки в результаті деформацій, що перевищують межу пружності основного матеріалу.

Міцність зчеплення покриттів з основою залежить від якості підготовки поверхні, від властивостей металів, температури напиляємої поверхні і режиму напилення [3].

На рисунку 2.8 зображена схема плазмового напилення.

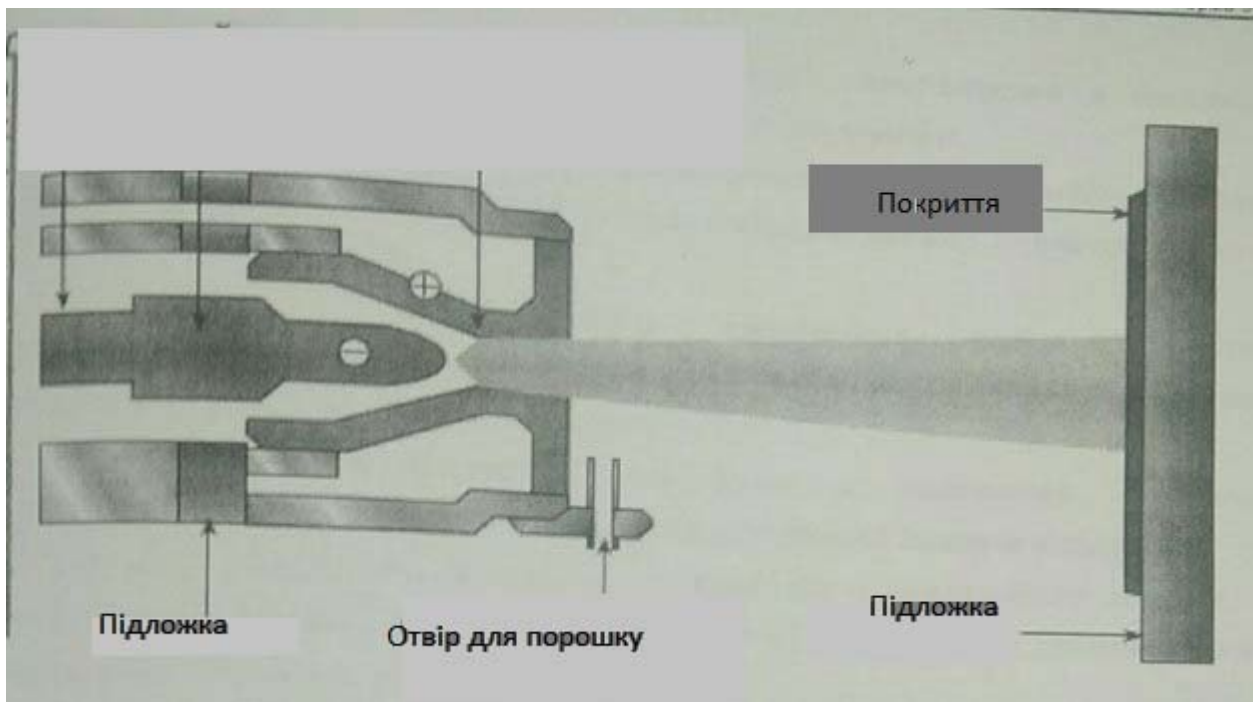


Рисунок 2.8 – Схема плазмового напилення

1) Газополум'яний метод напилення. Газополум'яне напилення – найбільш доступний з методів газотермічного напилення. При газополум'яному напиленні формуються частки малого розміру розплавленого металу і переносяться на оброблювану поверхню, де вони утримуються, тим самим формуючи безперервне покриття. Металевий чи полімерний, проволочний чи шнуровий матеріал подається в полум'я ацетилен-кисневої чи пропан-кисневої горілки, розплавляється та переноситься стислим повітрям на напиляємо поверхню, де, остигаючи, формує покриття. Метод простий в освоєнні і застосуванні, може застосовуватись як в ручному, так і в автоматизованому режимі [6].

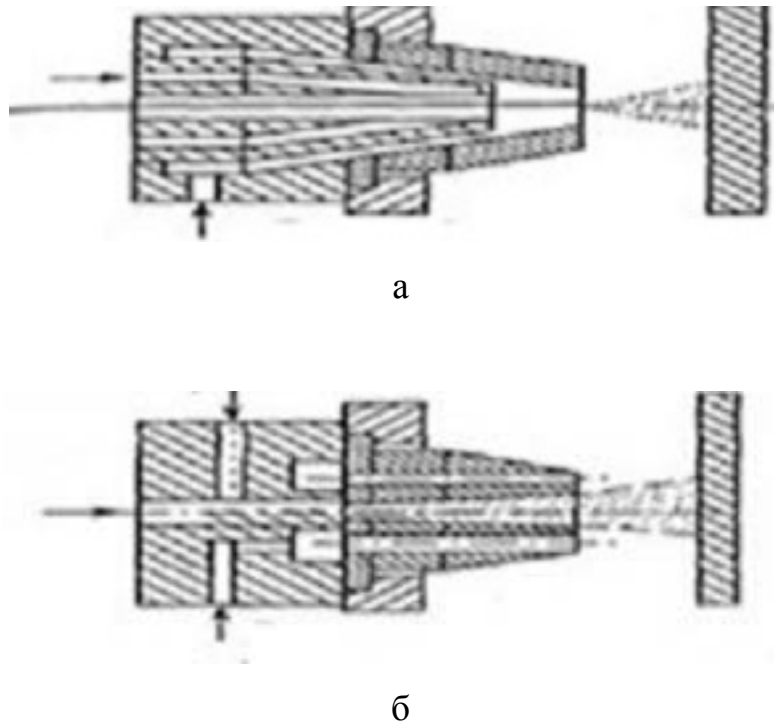
Покриття, отримані газополум'яним напиленням, відрізняються пористістю в 2...10%, можуть оброблюватись різанням або шліфуванням.

Переваги газополум'яного напилення:

- мале окислення матеріалу;
- дрібне розпилення матеріалу;
- хороша зчіплюваність покриттів з основою.

Недолік газополум'яного напилення – мала продуктивність процесу (2...3 кг/год) [7].

На рисунку 2.9 зображена схема газополум'яного напилення з використанням вихідного матеріалу у виді дроту або стержнів і у виді порошків.



а- у виді дроту або стержнів; б - у виді порошків.

Рисунок 2.9 – Схема газополум'яного напилення з використанням різного вихідного матеріалу

При газополум'яному напиленні для генерації тепла використовується хімічна енергія згоряння паливних газів. Найчастіше використовуються ацетилено-кисневі пальники, у яких ацетилен, як паливний газ, згоряючи в атмосфері кисню, генерує дуже високі температури. Порошок, дріт або прутки вводяться в осьовому напрямку у форсунку ззаду і подаються в полум'я на виході форсунки. Вихідний матеріал розплавляється і частки /

краплі розганяються у напрямку поверхні субстрату потоком газу, що розширюється, і струменями повітря.

На рисунку 2.10 зображений типовий пістолет для газополум'яного напилення. В звичайних пальниках для полум'яного напилення, струмінь палива згорає у кисні перед пальником, зовні форсунки. В деяких конструкціях стягуючий потік повітря подається через концентричний набір отворів на виході з форсунки і використовується для обмеження поширення газів, що розширюються. При цьому створюється зона згорання при підвищеній температурі.

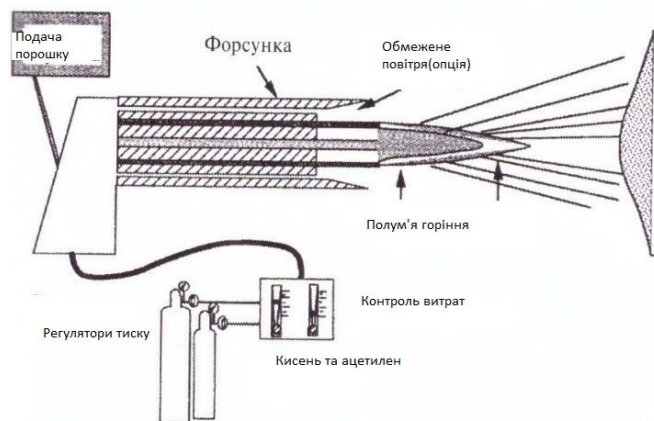


Рисунок 2.10 – Система газополум'яного напилення з використанням порошку

З рисунку 2.10 випливає, що пальник газополум'яного напилення складається з газорозподільних проходів крізь форсунку і змішувальних діафрагм на кінці форсунки. Форсунки використовуються для надання струменю потрібної форми. В пальниках з подачею дроту або прутка до конструкції додаються повітряні ковпачки, що створює концентрований струмінь повітря для розпилення розплавленого кінчику дроту або прутка. Дріт або прутки подаються механічно через центр форсунки у зону нагрівання. Значна перевага дроту або прутку над порошком полягає в тому, що тут досягається більш висока ступінь розплавлення, завдяки чому покриття виходять щільніші. Крім того, розпилююче повітря дозволяє

отримувати більш дрібні крапельки, що, в свою чергу, дає більш тонке і гладке покриття.

В процесах газополум'яного напилення співвідношення паливо / кисень і загальні норми витрати газу можуть регулюватися, щоб мати необхідний тепловий вихід. Додаткові теплові струмені, нижче (по потоку) зони горіння, можуть бути ще одним засобом регулювання термічного профілю полум'я. Швидкості газових струменів зазвичай не перевищують 100 м/сек, що надає швидкості часкам перед падінням на поверхню в межах 80 м/сек. При зовнішньому згорянні (або з відкритим полум'ям) температури струменю перевищують 2600 °C (4700 °F). Вони залежать від температури згорання паливно-кисневої суміші, а також від діаграми змішування газів горіння з навколишнім повітрям. Зазвичай пальники газополум'яного напилення мають таку конструкцію, яка дозволяє захоплювати частину повітря, необхідного для горіння, із струменів повітря, які призначені для розпилення або охолодження. Така конструкція додатково сприяє зниженню вмісту окислів в покриттях.

Подача порошку в розпилюючі пальники відбувається одним з двох способів: транспортуючими газами або під дією гравітації. Пристрої з гравітаційною подачею мають банки або пляшки з порошком, які встановлені на пальнику або зверху нього. Швидкість подачі порошку контролюється запірним клапаном, який дозує подання порошку до корпусу пальника, звідки він видаляється газами, що течуть через пальник. Пристої, які використовують транспортуючий газ, мають порошкові живильники, встановлені зовні. Порошкові живильники використовують потік транспортуючого газу для переносу порошку із живильника через шланг до розпилювального пальника. У якості транспортуючого газу при полум'яному напиленні зазвичай використовується повітря або азот.

Пристрої, які працюють на дроті або прутку, використовують вбудовані у пальник повітряні турбіни, які призводять у рух привідні ролики,

витягуючі вихідний матеріал зі свого джерела і виштовхуючі його через форсунку.

Основні компоненти типової системи газополум'яного напилення:

- джерело газу;
- джерело повітря;
- шланги для газу;
- газові регулятори для кисню, палива і повітря;
- витратоміри для контролю потоку газу;
- запобіжні затвори на пістолеті і регуляторах;
- пістолет для газополум'яного напилення, який складається з корпусу пальника, форсунки і ковпачка для розпилюючого/атомізуючого повітря;
- система подачі вихідного матеріалу, яка складається з порошкового живильника, бачка порошкового живильника і повітряно-турбінного приводу для дроту і прутка [19].

Процеси газополум'яного напилення зазвичай дають щільність покриття у діапазоні від 85 до 98 %, в залежності від матеріалу покриття і конкретної технології. При менших температурах і швидкостях струменю покриття виходить менш щільним. Покриття мають відносно грубі мікроструктури пластинок і відносно високі рівні пористості. Наявність оксидних включень в металевих покриттях зумовлена окисними умовами процесу газополум'яного напилення, до чого призводить активна взаємодія крапель з атмосферою[7].

2) Метод HVOF (HIGHVELOCITY OXYGEN FUEL) - надзвукового напилення. Надзвуковенапилення – це один з методів термічного напилення, в процесі якого напиляємий матеріал розпиляється високотемпературному газовому потоці на надзвукових швидкостях [22].

Покриття, отримані надзвуковим методом напилення, мають адгезійну і когезійну міцність, низьку пористість, низький зміст окислів, низькі втрати легованих елементів розпиляемого матеріалу (тобто передбачуємий хімічний

склад покриття), дрібнодисперсну і гомогенну мікроструктуру, низькі залишкові напруження, високу мікротвердість, можливість отримання покриттів великої товщини.

В камері згоряння горілки надзвукового напылення підпалюється суміш палива (керосин) з окислювачем (кисень). Високотемпературний потік з продуктів згоряння газової суміші утворює надзвуковий потік, швидкість якого складає близько $M7$, температура - близько 1500°C , а його теплова потужність - близько 500 кВт.

В надзвуковий потік безперервно з рівномірною швидкістю додається дрібнодисперсний порошок (напыляемый матеріал). При цьому частинці порошку захоплюються потоком, нагріваються і розганяються до швидкості 800...850 м/с.

Діапазон температури розігріву часток порошку у потоці знаходиться нижче температури оплавлення матеріалу порошку ($1000...1200^{\circ}\text{C}$), що забезпечує дуже низький зміст оксидів у сформованому покритті.

Кінетична енергія часток в момент зіткнення їх з підкладкою переходить в теплову, забезпечуючи високу адгезію (більше 80 МПа), когезію і низьку пористість покриття (менше 1%).

У процесі напылення поверхню оброблюваного виробу заборонено нагрівати до температури вище 200°C , для чого використовуються спеціальні технологічні прийоми – високі швидкості маніпулювання і охолодження деталі стислим повітрям.

Максимальні розміри деталей і мінімальний діаметр внутрішніх поверхонь деталей для відновлення напыленням визначаються габаритами технологічного обладнання та конфігурацією самої деталі.

Метод HVOF дозволяє наносити покриття товщиною від 50 мкм до декількох міліметрів. Оптимальну товщину покриття слід обирати в кожному окремому випадку, виходячи від експлуатаційних і технологічних міркувань.

Методом HVOF може бути нанесено покриття на сталь, чавун, кольорові метали і сплави.

Зберігають порошки у сухому приміщенні, у якому відсутні пари, кислоти, інші окислювачі, луги, у закритій тарі з відповідним маркуванням.

Оснащення повинне забезпечувати доступ надзвукового потоку до напиляємої поверхні під кутом $45\ldots 90^\circ$. Оснащення повинне захищати поверхні деталі, не підлягаючі напиленню, від впливу потоку напиляємих часток, а також від абразивних часток при обдувці електрокорундом перед напиленням.

Дозволяється використовувати антипригарну суспензію «AntiBond».

Процес HVOF-напилення характеризується внутрішнім горінням у замкненому обсязі. HVOF-напилення відбувається в постійному, безперервному режимі.

Принцип роботи слідує: гарячі гази подаються у великому обсязі в камеру згоряння, звідки вони попадають в обмежуючу форсунку (циліндр) довжиною від 8 до 30 см, через яку гази горіння залишають пристрій. Велика витрата газу і висока температура його згоряння дають швидкість газу на виході з форсунки в діапазоні від 1525 до 1825 м/сек. В цьому процесі використовуються такі гази, як водень, пропілен, пропан, ацетилен (також застосовується гас).

Важливо відмітити, що існують два різних класи пристроїв напилення при високошвидкісному згорянні, різні по тиску в їх камерах згоряння. Перший клас, для якого краще підходить визначення «високошвидкісний», характеризується тиском в камері згоряння понад 241 кПа і тепловим навантаженням за номіналом 527 МДж. Другий клас, який краще було б назвати «гіпершвидкісним», працює при номінальному тиску від 620 до 827 кПа і номінальному тепловому навантаженні біля 1 ГДж.

Гармати для високошвидкісного напилення в кисневому паливі мають камери згоряння з повітряним або водяним охолодженням. Суміш палива з

киснем згоряє тут під тиском, поточний струмінь полум'я / газу пришвидшується уздовж обмеженої охолоджувальної трубки або форсунки. Порошки, що переносяться транспортувальним газом, подаються у форсунку, де частки захоплюються в струмінь газу / полум'я, обмежений в об'ємі і маючий високий тиск [23].

На рисунку 2.13 зображені характерні особливості гармати / пістолета для високошвидкісного напilenня в кисневому паливі.

В такій конструкції теплопередача і тепла ефективність часток зростають зі збільшенням часу затримки.

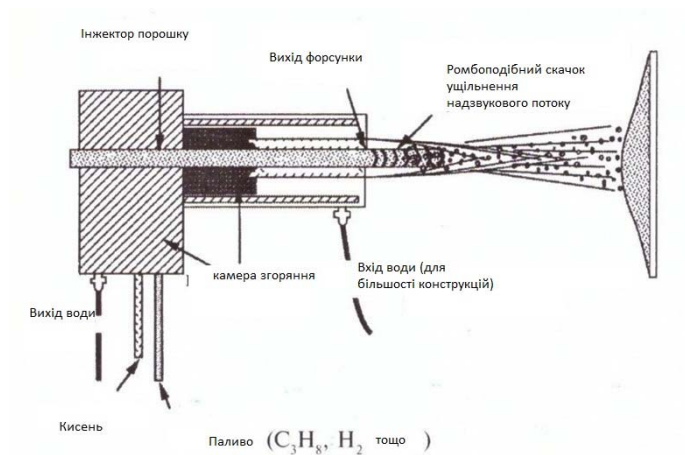


Рисунок 2.11 – Характерні особливості гармати / пістолета для високошвидкісного напilenня в кисневому паливі

На рисунку 2.11 ілюструються основні особливості HVOF-конструкції внутрішнього згоряння: водяне охолодження, інжекція часток і форсунка, що призводить до розширення газів горіння з надзвуковою швидкістю.

3 ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКРИТТІВ ТА МЕТОДІВ ЇХ НАНЕСЕННЯ

Для оптимізації вибору ущільнюючого покриття та методу його нанесення було проведено аналіз між хімічним складом, методом нанесення та економічним ефектом від використання того чи іншого методу.

3.1

В

ибір типу ущільнювального покриття

Розглянемо два види покриттів – ущільнювальні матеріали КНА та М-427.25. В таблиці 3.1 відображений хімічний склад покриття КНА.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад покриття КНА

Найменування матеріалу	Нітрид бору, %	C, %	Al, %	Si, %	Ni, %	Робоча температура, °C
КНА	6-7,5	1,0-1,5	0,3-0,8	1,8-2,1	Решта	900

В таблиці 3.2 відображений хімічний склад покриття М-427.25.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад покриття М-427.25

Найменування матеріалу	Ni, %	Cr, %	Al, %	Y, %	Co, %	Робоча температура, °C
Ущільнююче покриття М-427.25	32	21	8	1	Решта	1040

На рисунку 3.1 зображена діаграма порівняння робочих температур покриттів КНА і М-427.25.

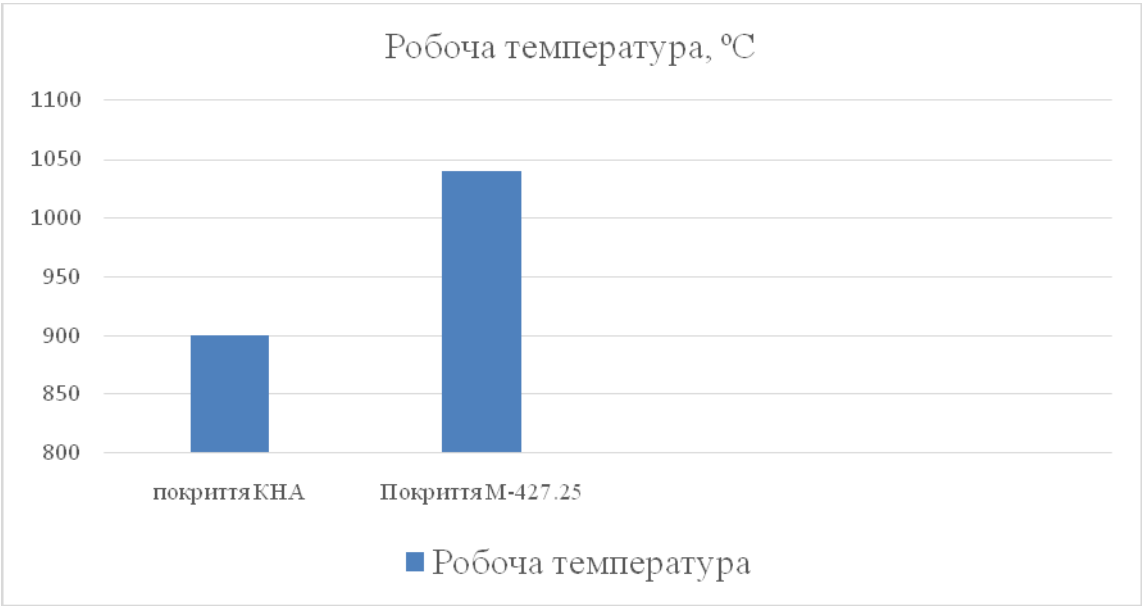


Рисунок 3.1 – Порівняння робочої температури покриттів

З рисунку 3.1 випливає те, що робоча температура покриття М-427.25 (1040 °C) дещо вища робочої температури покриття КНА (900 °C).

В таблиці 3.3 наведені механічні властивості порівнювальних покриттів.

Таблиця 3.3 – Механічні властивості покриттів

Найменування матеріалу	Твердість		Пористість, %
	НВ	HRC	
КНА	15...25		22...26
М-427.25		36...42	19...21

З таблиці 3.3 випливає те, що покриття М-427.25 твердіше за покриття КНА та має трохи нижчу пористість.

В таблиці 3.4 наведений фракційний склад порівнювальних покриттів.

Таблиця 3.4 – Фракційний склад покриттів

Найменування матеріалу	Прохід через сітку №0056, не більше, %	Прохід через сітку №0315, не більше, %	Прохід через сітку №0045, не більше, %	Прохід через сітку №0025, не більше, %
КНА	8	10		
М-427.25			5	10

З таблиці 3.4 видно те, що фракція матеріалу КНА трохи більша за фракцію матеріалу М-427.25.

На рисунку 3.2 зображена діаграма порівняння пористості покриттів.



Рис

унок 3.2 – Порівняння пористості покриттів

Таким чином можна зробити висновок, що покриття КНА має дещо нижчі показники, ніж М-427.25, однак, беручи до уваги кількість легуючих

елементів у М-427.25, які безпосередньо впливають на вартість, оптимальним покриттям обираємо ущільнююче покриття КНА [24].

3.2 Вибір методу нанесення покриття

Плазмове напилення є одним з методів надання особливих властивостей поверхні (зносостійкість, корозійностійкість, жаростійкість та ін.) при збереженні фізико-механічних властивостей деталі.

Плазмове напилення дозволяє досягти високу адгезійну та когезійну міцність покриття (до $8,0 \text{ кгс/мм}^2$), низьку пористість (4...8%), характеризується низьким вмістом окислів, низькими втратами легованих елементів розпиляемого матеріалу (тобто передбачуваний хімічний склад покриття), дрібнодисперсною і гомогенною мікроструктурою, низькими залишковими напруженнями, можливістю отримання покриттів великої товщини [8].

Товщина зносостійких покриттів після остаточної обробки повинна бути в межах 0,15...0,30 мм, при відновленні розмірів – 0,15...1,50 мм. Оптимальну товщину покриття слід обирати в кожному окремому випадку, виходячи з експлуатаційних і технологічних міркувань [10].

Максимальні розміри деталей і мінімальний діаметр внутрішніх поверхонь деталей для відновлення напиленням визначаються конфігурацією самої деталі і габаритами технологічного обладнання. Мінімальний діаметр внутрішніх поверхонь деталей визначається можливістю забезпечення параметрів режиму напилення – дистанції 100...120 мм та кута атаки – не менше 45° [11].

Плазмові покриття можуть бути нанесені на сталь, чавун, кольорові метали і сплави.

Переваги методу плазмового напилення:

- висока продуктивність;
- новелике нагрівання деталі (120-180°C);
- висока зносостійкість покриття;
- відносна простота техпроцесу і устаткування, яке застосовується;
- можливість нанесення покриттів будь-якої товщини з будь-яких матеріалів.

Недоліки методу плазмового напилення:

- низька механічна міцність покриття;
- низька міцність зчеплення з основою [12].

В таблиці 3.5 вказані можливі дефекти плазмових покриттів.

Таблиця 3.5 - Можливі дефекти плазмових покриттів

Найменування дефекту	Причина виникнення дефекту
Розшарування напиляемого слою	- Неправильна конфігурація напиляемого участка; - Незадовільна якість підготовки поверхні (недостатня шорсткість, наявність вологи, запиленості, забруднення); - Окислення підложки внаслідок перегріву, високі внутрішні напруження; - Велика різниця коефіцієнтів термічного розширення основи і покриття.
Розтріскування покриття	Високі внутрішні напруження в покритті
Різновтовщинність покриття вище допустимого	Нерівномірна подача напиляемого матеріалу. Нерівномірне переміщення потоку напиляемих часток відносно поверхні напилення.
З'явлення на поверхні покриття крупних капель напиляемого матеріалу	Нарощування матеріалу покриття на внутрішній стінці сопла – аноду
З'явлення капель міді на	Підвищена ерозія сопла – аноду в результаті його

покритті	зносу або погіршення водяного охолодження
----------	---

Розглянемо метод надзвукового напилення HVOF (HIGHVELOCITYOXYGENFUEL). Надзвукове напилення є одним з методів надання особливих властивостей поверхні (зносостійкість, корозійностійкість, жаростійкість) при зберіганні фізико-механічних властивостей деталі.

Було встановлено, що розвиваєма при HVOF-процесі висока швидкість газів, яка значно вища, ніж при традиційному газополум'яному або плазмовому напиленні, збільшує швидкість часток, що відповідно збільшує щільність покриття і силу його зчеплення з субстратом. Менші, порівняно з плазмовим напиленням, температури часток знижують рівень розплавлення і окислення. Не дивлячись на менші середні температури часток, високі щільності покриття досягаються завдяки властивим для HVOF-напилення високим швидкостям падіння часток, із-за чого частки деформуються, навіть, може бути, і не будучі добре розплавленими. Деякий нагрів часток відбувається при їх падінні, завдяки перетворенню кінетичної енергії у теплову, що ще більше сприяє утворенню щільних покриттів.

Такі характеристики HVOF-напиленого покриття, як густина, сила зчеплення і вміст окислів, успішно порівняні з аналогічними характеристиками для покриттів плазмового напилення. Міцність зчеплення покриттів високошвидкісного напилення в кисневому паливі значно краща. Пористість покриттів не перевищує 1 %. Даний вид напилення на даний момент вважається одним із самих оптимальних, однак вартість установки для напилення значно перевищує вартість попередників [23].

На напиляємій поверхні не повинно бути гострих кромek і інших концентраторів напруги. Радіуси округлення – не менше 0,2 мм.

В таблиці 3.6 вказані можливі дефекти HVOF покриттів.

Таблиця 3.6 - Можливі дефекти HVOF покриттів

Найменування дефекту	Причина виникнення дефекту
Розшарування напиляемого слою	- Неправильно підготовлена конфігурація напиляемогоучастку;
	- Незадовільна якість підготовки поверхні
	- (недостатня шорсткість, наявність вологи, забруднень та ін.);
	- Окислення підложки внаслідок перегріву, високі внутрішні напруження;
	- Велика різниця коефіцієнтів термічного розширення основи і покриття.
Розтріскування покриття	Високі внутрішні напруження у покритті
Різнотовщинність покриття вище допустимого	Нерівномірна подача напиляемого матеріалу. Нерівномірне переміщення потоку напиляємих часток відносно поверхні напилення.

Звичайно, метод надзвукового напилення HVOF (HIGHVELOCITYOXYGENFUEL) має ряд переваг над методом плазмового напилення, але метод плазмового напилення є набагато дешевшим, простішим, та часто використовується на підприємствах порошкової металургії.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що покриття типу КНА та метод плазмового нанесення є оптимальним. І він повністю задовольняє

всім вимогам щодо фізико-механічних характеристик покриттів, їх міцності, пористості та твердості, і має порівняно невелику вартість.

3.3 Можливі дефекти при нанесенні покриттів

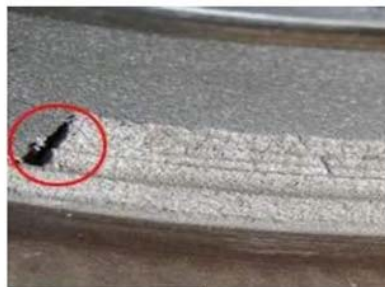
У процесі створення покриття, що працює в конструкції безконтактних лабіринтних ущільнень ГТД, до його твердості висуваються суперечливі вимоги. З одного боку, матеріал покриття повинен мати мінімальну твердість і, відповідно, зносостійкість. Дана вимога визначається необхідністю забезпечення можливості припрацювання покриття на етапі обкатки ГТД. Враховуючи биття ротора ГТД, а також його можливий дисбаланс, особливо на перехідних режимах роботи двигуна, на даному етапі можливий контакт гребінців лабіринтного ущільнення з покриттям і, у такий спосіб його припрацювання. Низька твердість покриття в цьому випадку дозволяє забезпечити припрацювання матеріалу покриття без зміни геометрії гребінців. Беручи до уваги малі радіуси кривизни і товщину гребінців лабіринтних ущільнень, їх зношування на початковому етапі роботи ГТД може призводити до збільшення протікання газу через лабіринтні ущільнення і, як наслідок, викликати зниження ефективності роботи турбіни та ГТД в цілому [13]. В процесі експлуатації двигунів сімейства ТВ3-117 спостерігалися випадки стирання гребінців лабіринтних ущільнень та істотна зміна їх геометрії. В свою чергу, в процесі експлуатації, мали випадки збільшення радіальних зазорів під час роботи ГТД внаслідок появи дефектів в покриттях, які пов'язані з низькою зносостійкістю.

Основними з них є тріщини, раковини, відколи; порушення суцільності. Також після експлуатації може проявитися відшаровування покриття (рисунк 3.3, а, б), ерозійне зношування (рисунк 3.3, в) і відколи (рисунк 3.3, г). Причиною появи відколів може бути механічний вплив на етапі складання або експлуатації.

На рисунку 3.3 зображені дефекти покриттів лабіринтних ущільнень.



а



б



в



Г

а,б – відшарування покриття, в – ерозійне зношування, г – відколи

Рисунок 3.3– Дефекти покриттів лабіринтних ущільнень

Серед важливих особливостей термічно напиленого покриття, які разом узяті визначають властивості покриття, варто відмітити ламелярну або шарувату пластинчасту структуру, наявність нерозплавлених або повторно затверділих часток, пор, включення окислів, гранул, фаз, тріщин і кордонів розділу. На рисунку 3.4нижче схематично зображені характеристики типового покриття і характерна мікроструктура обложеного шару / покриття.

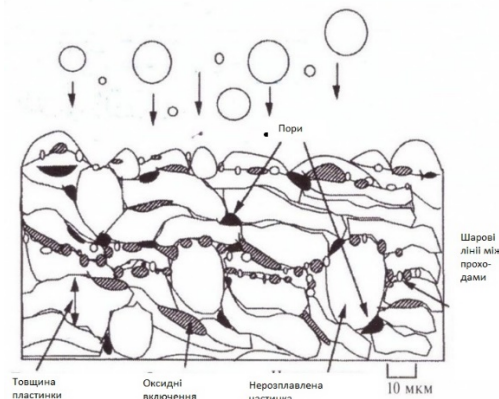


Рисунок 3.4 – Мікроструктура термічно напиленого покриття, яка демонструє його загальні особливості

Оксидні включення в металевих покриттях зазвичай видні як темні, витянуті фази, які на поперечному перерізі покриття виявляються як рядки, паралельні поверхні субстрату. Окисли утворюються при взаємодії часток з атмосферою і / або при нагріванні поверхні покриття під час його осадження.

Взаємодія гарячих часток з довкіллям, зазвичай повітрям, призводить до утворення плівки оксида і / або нитрида на поверхні часток. Збільшення часу затримки і підвищення температури часток збільшує товщину шару оксида або нитрида, що підвищує концентрацію оксидних рядків в покритті. Коли частки розтікаються при ударі, їх поверхневі плівки розламуються під дією поточного металу і включаються до осадженого шару, по мірі того, як краплі застигають у платівки, що показано на рисунку 3.5.

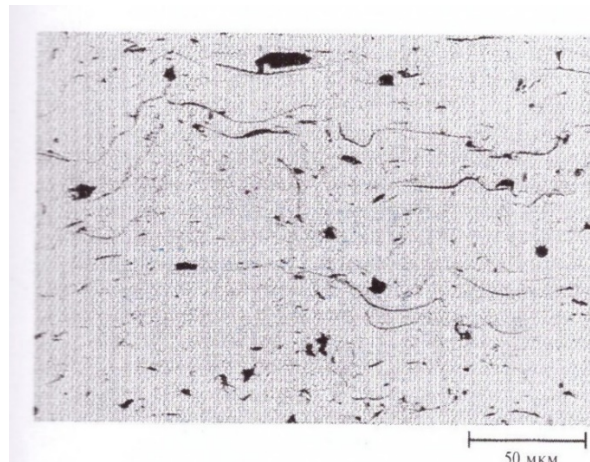


Рисунок 3.5 – Оксидні рядкові вclusions на покриттів

Було виявлено, що ці оксидні вclusions додають покриттю твердості, оскільки окисли мають значну твердість. Тому композитна суміш металу і окислу метала стає твердішою, ніж саме металеве покриття. Це збільшення твердості може призводити к підвищенню крихкості покриттів, тому що окисли легко ламаються. Якщо концентрація окислів буде дуже великою, то вони можуть перешкоджати зчепленню між пластинками, що зменшить внутрішнє зчеплення в покритті [14].

Тенденції параметрів, які зменшують кількість вclusions:

- усунення хімічно реактивного середовища шляхом використання екранів із інертного газу або камер з інертним газом;
- зменшення середньої температури часток шляхом зниження нагрівальної здатності струменів напилення;

- зменшення часу затримки часток шляхом мінімізації дистанції напилення або збільшення швидкості транспортування;
- зниження температури поверхні субстрату / покриття шляхом використання охолоджуючих повітряних струменів або збільшення швидкості переміщення апарату термічного напилення уздовж поверхні субстрату. При цьому окислення на поверхні покриття зводиться до мінімуму;
- використання порошку вихідного матеріалу з частками відповідного розміру. Більші частки мають менше відношення площі поверхні до об'єму, що зменшує загальний вміст окислів [15].

Пористість – ще одна важлива особливість покриття, яка значно впливає на його властивості. Пористість знижує внутрішнє зчеплення в покритті і сприяє підвищеному зносу та прискореній корозії.

На рисунку 3.6 зображені типові дефекти термічно напиленого покриття.

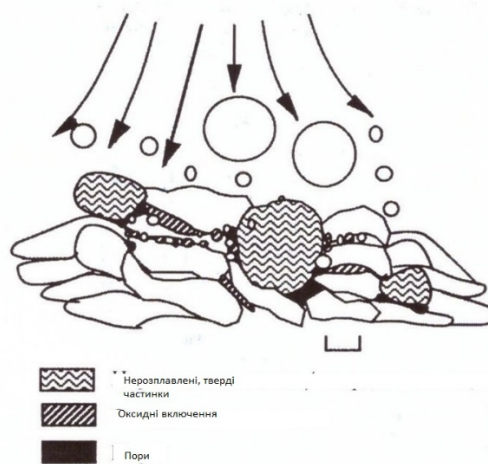


Рисунок 3.6 – Типові дефекти термічно напиленого покриття

Пористість зазвичай пов'язана з великою кількістю нерозплавлених або повторно затверділих часток, які опинилися включеними у покриття, як це показано на рисунку 3.6.

Слабке зчеплення пластинок або часток призводить до передчасного розтріскування, розшарування або вифарбовування покриття.

Причиною пористості може бути наступне:

- усадка матеріалу при його охолодженні із рідкого стану;
- захоплені нерозплавлені, частково розплавлені і повторно затверділі частки, які призводять до виникнення пустот;
- затінення від цих «нерозплавів», які створюють порожнечі по лінії прямої видимості, які не заповнюються розтікаючими після падіння краплями;
- погане зчеплення усередині пластин, що призводить до їх відділення;
- погане змочування на суміжних поверхнях або пластинах, причиною чого може бути низька температура чи повільний рух часток, або явище поверхневого натягнення;
- міжпластинкове або внутрішньопластинкове розтріскування;
- великі кути падіння при осадженні, що призводить до затінення або ефекту «завірюхи»;
- рікошет часток від маскуючих пристосувань або оснащення, що призводить до охолодження часток до того, як вони впадуть на поверхню покриття;
- затінення від сусідніх поверхонь;
- пористість, внутрішньо властива процесу виробництва порошку вихідного матеріала [16].

Властивості покриттів зазвичай виражаються через:

- силу зчеплення;
- твердість;
- стійкість до корозії / окисленню;
- термічні властивості;
- електричні властивості, такі як електропровідність, питомий опір і електрична міцність;

- магнітооптичні властивості, такі як поглинаюча і відбивна здібності;
- придатність до чистової механічної обробки [20].

Зчеплення покриття з субстратом і внутрішнє зчеплення між сусідніми пластинками залежить від:

- остаточних напружень усередині покриття;
- розплавлення і локалізованого сплавлення на поверхнях контакту між частками та між субстратом і прилеглими частками;
- дифузії з'єднань елементів через межі платівок;
- сил тяжіння, діючих на атомному рівні (сили Ван дер Ваальса);
- механічного зачеплення.

На рисунку 3.7 зображене зачеплення між частками покриття.

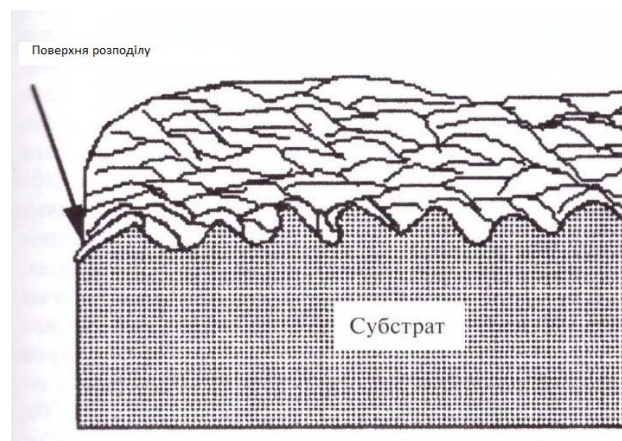


Рисунок 3.7 – Зачеплення між частками покриття

Механічне зачеплення (зображене на рисунку 3.7) історично розглядається як головний механізм зчеплення термічно напиленого покриття.

Механічне зачеплення відіграє важливу роль для зчеплення покриття з субстратом і внутрішнього зчеплення покриття, коли поверхні, що покриваються, мають такі особливості рельєфу, які дозволяють розплавленому матеріалу затікати усередину і заповнювати впадини рельєфу.

Окисли, бруд чи масло на поверхні субстрату заважають утворенню платівок і знижують локальне зчеплення, або взагалі роблять його

неможливим. Рівень зчеплення покриття визначає його надійність під дією механічних і термічних навантажень. Тому підготовка поверхні, її очищення і «загрубіння» - це дуже важливі етапи перед термічним напиленням [21].

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі надані основні заходи при нанесенні ущільнювальних покриттів на статорні деталі турбін газотурбінних двигунів.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Небезпеки, які пов'язані з порушенням роботодавцем вимог ергономіки стосовно організації робочих зон та робочих місць в приміщеннях дослідницької лабораторії, що може призвести до зниження працездатності.

Зокрема невідповідність розмірів робочої, а також максимальної кількості осіб, що можуть перебувати відповідно правил СНІП 2.09.04 – 87 «Адміністративні та побутові будівлі», та СНІП 2.09.02-85 «Виробничі будівлі», нераціонального розташування дослідницького приладдя та офісного обладнання;

б) Можливість ураження електричним струмом внаслідок порушення правил з електробезпеки, що може призвести до електротравми або летального наслідку;

в) Небезпеки, які пов'язані з проведенням дослідницьких робіт по нанесенню покриттів КНА, АНБ, 20Б, Л63, М-427.25 на різних установках, зокрема негативний вплив звукової детонаційної хвилі, що може бути загрозою для органів слуху, можливість отримання травм при порушенні правил з техніки безпеки при роботі на різних установках;

г) Небезпеки, які пов'язані з УЗК, зокрема негативний вплив ультразвукових полів;

- д) Небезпеки, які пов'язані з визначенням мікроструктури та пористості на дослідницьких зразках методом оптичної мікроскопії;
- е) Незадовільний параметр повітряного середовища в адміністративному приміщенні. Причиною може бути незадовільна робота систем опалення та повітрообміну;
- є) Недостатнє освітлення приміщень, де розташоване робоче місце контролера, що може бути пов'язано з нераціональним вибором освітлювальних приладів;
- ж) Можливість загорянь внаслідок порушення правил з пожежної безпеки, що може призвести до пожежі;
- з) Небезпеки, які пов'язані з умовами праці період надзвичайних ситуацій [25].

4.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

а) Згідно вимог НПА ОП 0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями з охорони праці працівників» основним завданням роботодавців є організація досконалих умов праці для кожного працівника.

Це завдання вирішується шляхом оптимізації:

- санітарно-технічних заходів (нормалізація санітарно-гігієнічних умов виробничого середовища – освітлення, опалення, вентиляції та ін);
- будівельно-планувальних заходів (реконструкція робочих місць, виробничих ділянок, цехів);
- організаційних заходів (організація праці, виробництва, контроль за параметрами умов праці та ін).

Заходи, спрямовані на підвищення працездатності людини і поліпшення стану здоров'я шляхом оптимізації:

- організаційно-профілактичних заходів (професійний відбір кадрів, профорієнтація, навчання, раціоналізація прийомів праці тощо);
 - організаційних заходів (раціоналізація режимів праці та відпочинку, зміна форм обслуговування робочих місць та ін.);
 - медико-біологічних та профілактичних заходів (використання засобів підвищення працездатності та опірності організму людини тощо);
 - соціально-психологічних заходів (нормалізація психологічного мікроклімату в колективі, формування позитивної мотивації праці тощо);
 - захисних заходів (застосування засобів індивідуального захисту)
- [26].

Працездатність людини в багатьох випадках визначається правильним встановленням режиму праці та відпочинку, що означає зміну періодів праці та відпочинку протягом доби, тижня й тривалого періоду.

Під час розробки режимів праці та відпочинку необхідно встановити:

- тривалість періодів безперервної праці протягом доби (тривалість робочої зміни);
- інтервали між періодами безперервної праці (між змінами);
- кількість змін, які забезпечують чергування;
- тривалість та форму відпочинку.

Організовуючи відпочинок між періодами праці, потрібно передбачити використання різних його форм – активної та пасивної.

Під час виробничого процесу доцільно враховувати антропометричні та психофізіологічні особливості людини, її можливості стосовно зусиль, що прикладаються до органів керування машиною, ритму виконання операцій, а також анатомо-фізіологічні відмінності між чоловіками та жінками. Комплексна оцінка цих можливостей людини і є ергономічним критерієм.

Реалізація основних ергономічних вимог щодо режимів праці та відпочинку дає змогу забезпечити необхідний рівень працездатності, зменшити втому, зберегти здоров'я людей;

б) З метою забезпечення захисту від ураження електричним струмом, необхідним є знання основних заходів для попередження уражень електричним струмом. Організаційні заходи – до виконання робіт допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли навчання та перевірку знань з захисту від ураження електричним струмом. Основним нормативним актом є ПУЕ 2019 (правило устрою електроустанов). Ремонт обладнання повинен здійснювати тільки спеціальний підготовлений персонал. Для кожного електроспоживного обладнання повинні бути складені експлуатаційні схеми нормальної і аварійної роботи. Технічні заходи – розташування струмоведучих частин на недоступній висоті (до 1000 В не менше 3,5 м, більше 1000 В – 6 м). Всі не ізольовані струмопровідні лінії повинні бути надійно огорожені суцільними огорожами, відкриття або зйом яких можливі тільки за допомогою спеціальних пристроїв. Опір ізоляції електричних дротів повинен бути не менше 0,5 Ом. Обов'язковим є захист не заземлення або занурення. Обов'язковим є використання індивідуальних засобів захисту, зокрема гумового діелектричного килимку, опір якого слід періодично перевіряти. Також обов'язковим є встановлення автоматичних блокуючих пристроїв, які запобігають небезпечним діям людини. Блокуючі пристрої розподіляють на механічні, електричні, та електро механічні;

в) З метою забезпечення безпечної роботи по нанесенню покриттів детонаційним методом, інсталяцію розташовують в окремому приміщенні або кімнаті, також можуть використовувати інші методи загородження для запобігання можливих механічних травм. Інсталяція генерує високий рівень шуму. Згідно до ДСН 3.3.6.037-99 рівень шуму не повинен перевищувати 50 дБ. Для зниження впливу шуму можуть застосовувати будівельно акустичні заходи за рахунок застосування кожухів, екранів, кабін спостереження, звукоізолюючих облицювань і глушників шуму. Також важливим є

використання індивідуальних засобів захисту а саме використання навушників, м'яких шоломів, які знижують рівень звукового тиску на 40-50 дБ [27];

г) Для забезпечення безпеки при роботі з ультразвуковим контролем передбачене екранування ультразвукових генераторів з листової сталі або дюралюмінію, покритих звукопоглинаючим матеріалом, з метою захисту персоналу від потужних полів. Згідно ДСН 3.3.6.037-99 рівень звукового тиску в октавних смугах з середньгеометричними частотами нормується в межах від 80 до 40 дБ в залежності від частоти. Також зводиться до мінімуму близький контакт персоналу з джерелом ультразвукових полів;

д) При проведенні дослідження якості нанесених покриттів для попередження ураження органів зору передбачають використання мікроскопа тільки за умови раціональної комбінації об'єктивів, окулярів. При вживанні їх треба пам'ятати про те, що збільшення повинно знаходитися в межах від 500 до 1000 апертур. Об'єктиви, апохромати в поєднанні з компенсаційними окулярами для візуального спостереження дають збільшення.

Крім правильної комбінації об'єктивів і окулярів, не менш важливе значення має і правильне застосування світлофільтрів. Як правило, при роботі з об'єктивами-ахроматами слід застосовувати світлофільтри, а з апохроматами можна працювати і без них. Об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх кольорів видимої частини спектра. З цієї причини при білому світлі вони дають зображення з нечіткими контурами, пофарбованими головним чином по краю поля зору. Щоб погасити всі кольори, в яких об'єкт не має корекції, застосовують жовто-зелений світлофільтр. З огляду на те, що об'єктиви-апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимої частини спектра, жовто-зелені світлофільтри для них зайві [28].

4.3 Заходи щодо виробничої санітарії та гігієни праці

е) Для нормалізації параметрів повітряного середовища в виробничих приміщеннях передбачається використовувати технічні засоби по забезпеченню нормованих параметрів. До них відноситься водяне або парове опалення, природна або штучна вентиляція. В холодний період року штучну вентиляцію, проточну витяжку поєднують з функцією підігріву зовнішнього повітря калорифер. У адміністративних приміщеннях використовуються кондиціонери.

У виробничих приміщеннях, на робочих місцях з комп'ютерною технікою забезпечуються оптимальні значення параметрів мікроклімату: температури, відносної вологості та швидкості переміщення повітря, для легких фізичних робіт категорій 1а або 1б, згідно вимог ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», наведених у таблиці 4.1 [26].

Таблиця 4.1 – Норми мікроклімату для приміщень з комп'ютерною технікою

Пора року	Категорія робіт	Температура повітря, °С, не більше	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодна	Легка - 1а	22-24	40-60	0,1
	Легка - 1б	21-23	40-60	0,1
Тепла	Легка - 1а	23-25	40-60	0,1
	Легка - 1б	22-24	40-60	0,2

У теплу пору року для забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату можуть використовуватися побутові кондиціонери. При їх виборі необхідно врахувати площу приміщення

Для забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату (температури, вологості, швидкості переміщення і чистоти повітря) в приміщеннях з ПК повинні бути передбачені системи вентиляції, кондиціонування та опалення згідно ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування»;

є) Приміщення, обладнані ПК з ВДТ повинні мати природне і штучне освітлення. Оскільки при недостатньому освітленні різко знижується продуктивність праці користувачів ПК, спостерігається швидка їх стомлюваність, а також можливе виникнення короткозорості. У виробничих та адміністративно-громадських приміщеннях, у разі переважної роботи з документами, дозволяється застосування системи комбінованого освітлення. Тобто крім системи загального освітлення додатково встановлюються світильники місцевого освітлення. Якщо значення освітленості неможливо забезпечити системою загального освітлення, дозволяється використання місцевого освітлення.

Вимоги до природного та штучного освітлення приміщень, обладнаних ПК з ВДТ, визначаються згідно ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення».

Природне освітлення має здійснюватися через світлові прорізи, орієнтовані переважно на північ або північний схід і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски на поверхнях дисплеїв і клавіатури, повинні бути передбачені сонцезахисні пристрої на вікнах (жалюзі або штори). Задовільне природне освітлення легше забезпечити в невеликих приміщеннях на 5-8 робочих місць.

Штучне освітлення в приміщеннях з ПК повинно здійснюватися системою загальногорівномірного освітлення.

Значення освітленості на поверхнях робочих столів, в зоні розміщення документів, має становити 300-500 лк. У разі

використання місцевого освітлення світильники слід встановлювати таким чином, щоб не створювати відблисків на поверхні екрану ПК, а освітленість екрану ПК має не перевищувати 300 лк [28].

4.4 Заходи з пожежної безпеки

ж) Заходи з пожежної безпеки визначаються відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні». Категорію виробництва за пожежною небезпекою (А, Б, В, Г, Д) споруд (приміщень) цеху (ділянки, підстанції) визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» і СНиП 2.09.02-85* «Производственные здания». Відповідно до категорії виробництва з пожежної безпеки та вимогам ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», визначають ступінь вогнестійкості приміщення цеху (дільниці, підстанції). Шляхи евакуації працівників на випадок пожежі (переходи, евакуаційні виходи) передбачають згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги». Максимальну відстань від найближчого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу визначають згідно п. 2.29 (табл. 2) СНиП 2.09.02-85* «Производственные здания». Відповідність обладнання, силових і освітлювальних мереж вимогам пожежної безпеки в першу чергу залежить від відповідності ступеня захисту їх оболонок (ІР) класу пожежаної небезпечної зони (П-I, П-II, П-IIIа і П-III), визначених згідно НПА ОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок». Засоби виявлення займань та

«Системи протипожежного захисту».

В даний час можуть використовуватися:

- охоронно-пожежна сигналізація (ОПС) неадресного типу;
- порогово-охоронно-пожежна сигналізація;
- адресно-порогово-охоронно-пожежна сигналізація [29].

4.5 Заходи безпеки в надзвичайних ситуаціях

з) Укриття населення в захисних спорудах — це комплекс заходів із завчасним будівництвом захисних споруд, а також пристосуванням наявних приміщень для захисту населення та підтримання їх у готовності до використання. Укриттю в захисних спорудах у надзвичайних ситуаціях підлягає все населення України. Фонд захисних споруд створюється шляхом обстеження й обліку підземних та наземних будівель і споруд, що відповідають вимогам захисту населення; до обладнання з урахуванням реальної обстановки підвалів, погребів та інших заглиблених приміщань; обстеження і взяття на облік підземних і наземних будівель та споруд гірничих виробок і природних порожнин, що відповідають вимогам захисту; у разі необхідності переобладнання цих приміщень; будівництво заглиблених споруд, пристосованих для захисту, що окремо розташовані від об'єктів виробничого призначення; масового будівництва

періодзагрозинадзвичайнихситуаційнайпростішихсховищ та укриттів; будівництваокремихсховищ та протирадіаційнихукриттів. Центральний орган виконавчоївлади, до компетенціїякого належать питаннязахистунаселення і територійвіднадзвичайнихситуацій,визначаєпереліксховищ, протирадіаційнихукриттів та іншихзахиснихспоруд, якінеобхіднобудувати, щозатверджуєтьсяКабінетом МіністрівУкраїни. Потреби в захиснихспорудахвизначають, виходячи з необхідностіукриттявсіхпрацюючих за місцемроботи і проживання, усьогонепрацюючогонаселення за місцемпроживання. Укриттянаселення в захиснихспорудах є надійним способом захистувідуражаючихфакторівядерної, хімічної, бактеріологічної, звичайноїзброї, у разіаварій і деякихстихійних лих (ураганів, сніговихзаносів). Захисніспоруди за своїмпризначенням і захиснимивластивостямиподіляються на сховища, протирадіаційніукриття (ПРУ) і найпростішіукриття — щілини. Сховища і протирадіаційніукриттябудуютьзавчасно, вони маютьподвійнепризначення: для потреб об'єктів народного господарства (навчальнікласи, для спортивнихсекцій та ін.) і укриттянаселення. Сховища - цеінженерніспоруди, якізабезпечуютьнадійнийзахист людей відусіхуражаючихфакторів ядерного вибуху, отруйних і СДЯР, бактеріальнихзасобів і уражаючихфакторівзвичайноїзброї, обвалів і уламківзруйнованихбудівель і споруд. Класифікуються вони за захиснимивластивостями, місткістю, місцемрозміщення, забезпеченнямфільтровентиляційнимобладнанням і часом побудови. За захиснимивластивостями (віддіївибуховоїхвилі) сховищাপоділяються на п'ятькласів. За місткістюсховищাপоділяються на: малі — до 150 осіб, середні — від 160 до 450, великі — понад 450 осіб. За місцемрозташування — на вбудовані, якірозміщені у підвальнихприміщенняхбудівель, та окремопобудовані поза будівлями. За забезпеченнямфільтровентиляційнимобладнанням —

промислового виготовлення і спрощене, виготовлене з підручних матеріалів. За часом побудови на: побудовані за часом і швидко споруджені. Сховища будуються з урахуванням таких вимог: забезпечувати захист людей від усіх уражаючих факторів, безперервне перебування в них людей не менше двох діб, розташування на місцевості, що не затоплюється на відстані від ліній водостоку і каналізації, мати входи і виходи з тим ступенем захисту, що й основні приміщення, а на випадок їх завалу - аварійні виходи, мати вільні підходи, де не повинно бути горючих або дуже легкозаймливих матеріалів, висота основних приміщень не менше 2,2 м і рівень полу, вище ґрунтових вод не менш як на 20 см. Сховища складаються з основного приміщення для розміщення людей і допоміжних приміщень - входів, для фільтровентиляційного обладнання, санітарного вузла, для дизельної установки, резервуарів для води чи артезіанських свердловин, для продуктів харчування, медичної кімнати, тамбур-шлюзи. Площу приміщення, призначеного для укриття людей, розраховують на одну особу 0,5 м² при дворусному і 0,4 м² при тріярусному розміщенні нар, у робочих приміщеннях пунктів управління - 2 м² на одного працюючого, місця для сидіння розміром 0,45 х 0,45 м, а для лежання - 0,55 х 1,8 м. Щоб у сховище не проникало повітря, забруднене радіоактивними речовинами, отруєнене небезпечними імічними речовинами і заражене бактеріальними засобами, воно має бути герметичним. Входи до сховища обладнують двома шлюзовими камерами (тамбурами), відокремленими від основного приміщення і перегородженими між собою герметичними дверима. Зовні знаходяться міцні захисні герметичні двері, які можуть витримати ударні хвилі ядерного вибуху. Аварійний вихід — це підземна галерея з виходом на територію, яка не завалюється, через вертикальну шахту й оголовок. Аварійний вихід закривається захисно-герметичними віконницями, дверима для захисту від ударної хвилі. Оголовок розміщується відбудівель на відстані, яка дорівнює половині висоти найвищої будівлі плюс 3 м - це і є територія, яка не

завалюється. У

фільтровентиляційному приміщенні розміщується фільтровентиляційний агрегат, який вентилює приміщення й очищає зовнішнє повітря від РР, хімічних речовин і бактеріальних засобів. Фільтровентиляційна система може працювати у двох режимах: чистої вентиляції і фільтровентиляції. У першому режимі повітря очищається від грубодисперсного радіоактивного пилу, а в другому - від решти радіоактивних речовин, а також отруйних, сильнодіючих ядовитих речовин і бактеріальних засобів. Крім цього, може бути режим повної ізоляції сховища з регенерацією повітря у ньому. Якщо сховище загерметизоване повністю і надійно, то після закривання дверей і приведення фільтровентиляційного агрегату в дію тиск повітря в середині сховища стає трохи вищим ніж атмосферний, утворюється так званий підпір. За величиною підпор у роблять висновки про стан герметизації сховища: він має дорівнювати приблизно 5 Па (0,5 мм вод. ст.). У сховищі обладнують різні інженерні системи: електропостачання - труби з електропроводкою фарбують у чорний колір, водопостачання - труби фарбують у зелений колір, опалення - труби фарбують у коричневий колір, радіотрансляційна точка, телефонний і радіозв'язок. Там також мають бути дозиметричні й хімічні прилади розвідки, засоби індивідуального захисту, засоби гасіння пожеж, аварійний запас інструментів, засоби аварійного освітлення, запас медичних засобів, продуктів і води. Після деякого дообладнання - встановлення захисних герметичних пристроїв, систем фільтровентиляції, водопостачання та ін., як сховища можуть бути використані шахтні виробки, катакомби, метрополітен, транспортні й пішохідні тунелі, заглиблені частини будівель, підземні (у скельних породах) приміщення різного господарського призначення [25].

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

5.1 Виробництво ущільнювальних покриттів

Розвиток і вдосконалення техніки пов'язаний з підвищенням швидкості та експлуатаційного навантаження машин і механізмів, агресивності середовища, де вони експлуатуються і таке інше. Використання традиційних конструктивних матеріалів в окремих випадках не задовольняє комплекс вимог, які висуваються до машин і механізмів. У зв'язку з цим економічно та технічно доцільно поширювати принципово новий підхід до вибору матеріалів на етапі проектування деталей машин та конструкцій, який полягає в тому, що механічна міцність деталі або конструкції гарантується за рахунок одного матеріалу, а спеціальні властивості (зносостійкість, жароміцність, корозійна стійкість та ін.) за рахунок формування на поверхні тонких шарів інших матеріалів - покриттів. Внаслідок цього забезпечується підвищення довговічності роботи деталі або конструкції, зменшуються витрати легуючих елементів, знижується ціна виробу. Одним з перспективних методів нанесення ущільнювальних покриттів є процеси плазмового нанесення покриття, які набули широкого розповсюдження в Україні і в світі, як при виготовленні нових виробів, так і при відновленні деталей і конструкцій, що були в експлуатації.

Покриття активно використовуються в авіації, машинобудуванні енергетиці, будівництві, нафтопереробці, металургії, електроніці. В розвинених державах (США, Німеччина, Франція, Японія, Скандинавські країни) темп зростання використання плазмового методу напилення складає 5-7%, в Індії - 15-17%, у Китаї -20%.

За даними ITSA у США у 2009 році практично третина галузей промисловості використовувала плазмове напилення, причому 25% з цієї третини використовували плазмове напилення в динамічному вакуумі і в контрольованій атмосфері.

5.2 Техніко-економічні розрахунки

Метою цього розділу є обґрунтування вибору нанесення ущільнювального покриття типу КНА методом плазмового напилення. В таблиці 5.1 наведений опис ідеї.

Таблиця 5.1 - Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Нанесення покриття плазмовим методом замість методу HVOF (HIGH VELOCITY OXYGEN FUEL)	Авіабудування	Зменшення вартості зі зберіганням необхідних властивостей та характеристик
	Приватні виробничі компанії	

Розглянемо показники стану ринку. В таблиці 5.2 наведена попередня характеристика потенційного ринку.

Таблиця 5.2 - Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Головні конкуренти	АТ «Полтавський турбомеханічний завод»
		ДП «Івченко – Прогрес»
		ТОВ «Ужгородський турбогаз»

2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
3	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає

Кінець таблиці 5.2

4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Потребує сертифікації
---	---	-----------------------

Розглянемо попередню характеристику потенційних клієнтів, яка відображена в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

№ п/п	Потреба, що формується на ринку	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
1.	Потреба в нових якісних матеріалах	Машинобудівні підприємства, Приватні виробничі компанії	Цільова група, що хоче змінити та здешевити виробництво	Якісний новий матеріал, який можна використовувати в наявній обладнанні

В таблиці 5.4 наведено SWOT-аналіз проєкту, базуючись на характеристиках проєкту, що були надані в попередніх таблицях.

Таблиця 5.4 – SWOT-аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
-----------------	-----------------

- менша собівартість; - покращені умови безпеки; - простий спосіб введення легуючих елементів в шихту.	- відносно низька щільність напилення.
--	--

Кінець таблиці 5.4

Можливості:	Загрози:
- впровадження в найпоширеніші методи нанесення напилення не дорогими матеріалами; відсутність необхідності придбання додаткового або сучаснішого обладнання; - можливість регулювання способу введення легуючих елементів в шихту; забезпечення правил техніки безпеки на машинобудівному підприємстві без залучення додаткових засобів захисту робітників.	- висока конкуренція інших ущільнювальних покриттів (наприклад, 20Б).

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 5.5).

Таблиця 5.5 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Підприємства	Можливість удешевити	великий	Існує два конкуренти, які	Швидкодія

		процес нанесення ущільнювальн ого покриття		виробляють схожу, але більш дорогу продукцію	
--	--	---	--	---	--

Кінець таблиці 5.5

2	Приватні компанії	Пошук нових технологічних рішень	середній		Швидкодія
Які цільові групи обрано: обираємо приватні виробничі компанії та підприємства					

Стейкхолдер (з *англ. stakeholder* — *зацікавлена сторона*) — це особа чи організація, яка може вплинути на роботу проєкту, має певне відношення до нього. Власне, будь-яке відношення — пряме чи опосередковане.

Стейкхолдери дуже різнотипні і включають як очевидних учасників — керівництво та працівників компанії, зовнішніх замовників, партнерів, інвесторів, так і тих, хто не є залученими чи зацікавленими в успіху проєкту, але своєю діяльністю можуть йому посприяти чи навпаки зашкодити, наприклад ЗМІ чи держструктури.

Визначення та вивчення стейкхолдерів дозволяє ефективніше управляти ризиками і підготувати більш продуманий план дій на випадок виникнення складнощів. Аналіз зацікавлених сторін допомагає виявити тих, на кого слід зробити ставку в досягненні успіху, а хто навпаки може негативно впливати на результати проєкту, як це змінити і до кого звертатись у разі тих чи інших перешкод.

На рисунку 5 зображена карта стейкхолдерів.

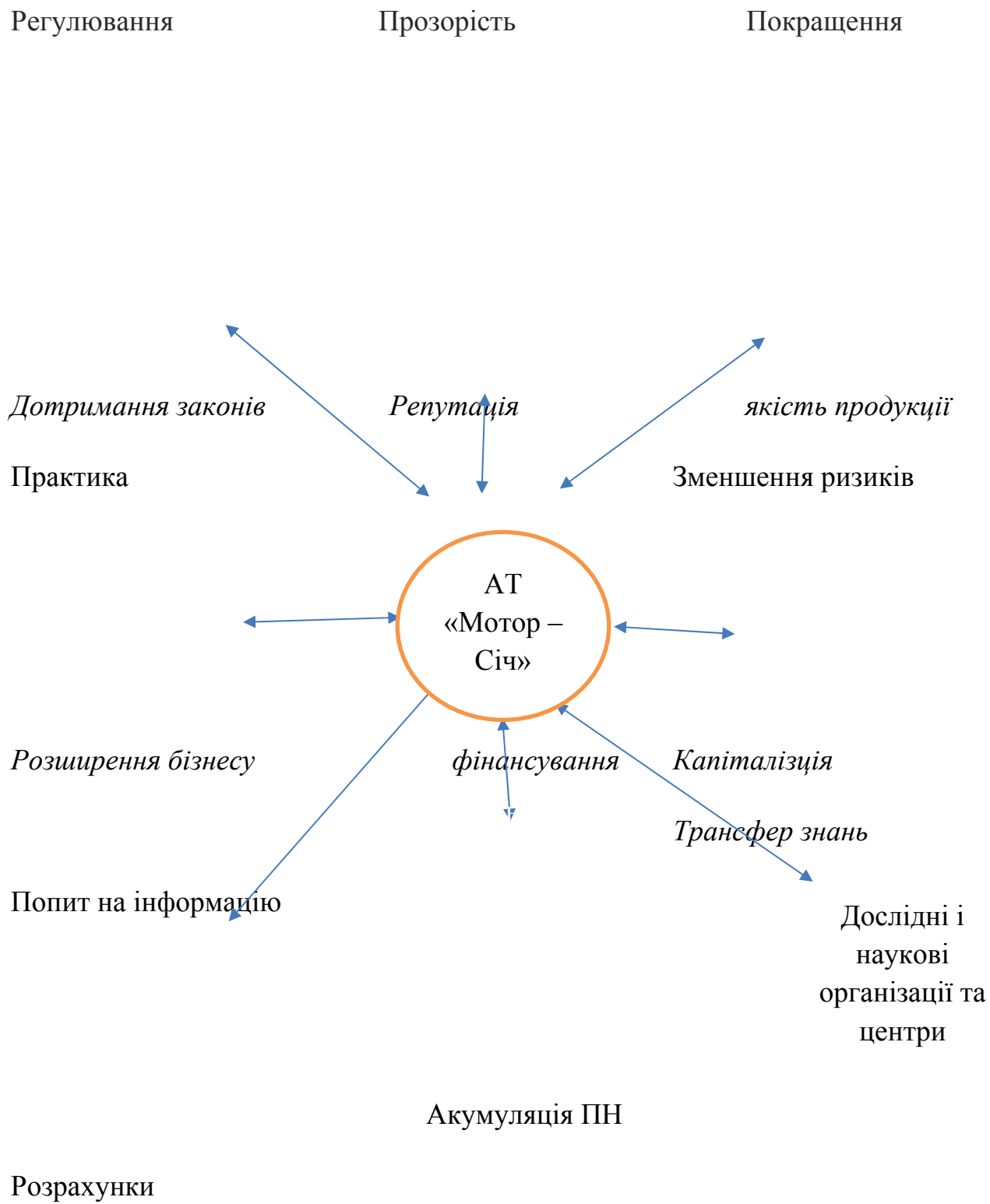


Рисунок 5.1 – Карта стейкхолдерів

Визначення фонду заробітної плати,затрати на оплату праці є одним з основних елементів собівартості продукції. Вона складається з:

- основної з / п;
- додаткової з / п;
- інших заохочувальних та компенсаційних витрат.

Основна зарплата – це винагорода за виконання праці відповідно з установленими нормами праці (норми часу, продуктивності, обслуговування, посадові зобов'язання). Додаткова зарплата – це винагорода за працю окрім установленої норми, за успіхи в праці, за особливі умови праці, за винахідливість. Вона включає доплати, надбавки, премії, пов'язані з виконанням виробничих завдань і функцій. До інших заохочувальних і компенсаційних виплат належать виплати за підсумками роботи за рік, премії по спеціальних системах і положеннях, компенсаційні грошові і матеріальні виплати, які не передбачені актами законодавства та ін.

В таблиці 5.6 відображені склад, чисельність та фонд заробітної плати виробничих працівників.

Таблиця 5.6 - Склад, чисельність та фонд заробітної плати виробничих працівників

Категорії працівників	Наявна чисельність, осіб		Тарифна ставка за розрядом виконуваних робіт, грн / годину	Ефективний фонд робочого часу, годин	Тарифний заробіток, грн.	Преміальний відсоток до тарифного заробітку	Розмір премії, грн.
	за зміну	на добу					

Виробничі працівники, в тому числі: 1. Основні працівники							
Металізатор	2	2	130	2080	540800	20	108160

Кінець таблиці 5.6

Токар	2	2	105	2080	436800	20	87360
2. Допоміжні працівники Складальник	1	1	90	2080	187200	20	37440
3. Черговий та ремонт- ний персонал Слюсар по ремонту устаткування	1	1	100	2080	208000	20	41600
Разом	6		X	X	X	X	

В таблиці 5.7 відображені склад, чисельність та фонд заробітної плати адмінперсоналу.

Таблиця 5.7 - Склад, чисельність та фонд заробітної плати адмінперсоналу

Посада	Кіль- кість осіб	Посадов ий оклад, грн	Преміальн ий відсоток до окладу, %	Сума премії, грн	Місячна заробітн а плата, грн	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
--------	---------------------	-----------------------------	--	------------------------	--	---	-------------

Начальник дільниці	1	30000	20	6000	36000	432000	9504 0
Майстер	1	22000	20	4400	26400	316800	6969 6
Разом управлінсько го персоналу	2		X			748800	1647 36

Загальний фонд заробітної плати складає:

$648\,960 + 524\,160 + 224\,640 + 249\,600 + 748\,800 = 2\,396\,160$ (грн).

Розглянемо розрахунок матеріальних витрат з урахуванням виробничої програми та необхідного обсягу сировини та внесемо їх в таблицю 5.8.

Таблиця 5.8 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Норматив у розрахунку на один. продук.	Виробнича програма	Обсяг сировини, кг	Ціна	Сума, грн

	(послуг), кг				
Шихта (подрібнена суміш)	0,85	5000 виробів	4250	2900	12 325 000
Графіт	0,02		100	42	4 200
Нітрит бору	0,12		600	8	4 800
Алюміній	0,01		50	98	4 900
Разом					12 338 900

В таблиці 5.9 наведений розрахунок вартості спожитих послуг.

Таблиця 5.9 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Норматив у розрахунку на один. продук. (послуг)	Виробнича програма	Обсяг послуг	Тарифи	Сума грн
Електропостачання	30	5000 виробів	150 000	5,428	814 200
Водопостачання	0,8		4 000	41,136	164 544
Теплопостачання	1,2		6 000	7,42	44 520
Разом					1 023 264

В таблиці 5.10 наведено розрахунок амортизації.

Таблиця 5.10 – Розрахунок амортизації

Група	Норма	Первісна	Надійшло ОЗ	Вибуло	Сума,
-------	-------	----------	-------------	--------	-------

основних засобів	амортизації	вартість ОЗ на 01.01			ОЗ		Грн.
			дата	пер. вар.	дата	пер. вар.	
Установка для нанесення покриття	6		01.01.23	15 000 000,00	-	-	15 000 000
Мостовий кран	3		11.06.23	100 000,00	-	-	120 000
Сушильний апарат	2		12.07.23	70 000,00	-	-	70 000
Разом							15 170 000

Визначимо річну суму амортизації з урахуванням первинної вартості основних засобів та норм амортизації за формулою 1.1:

$$\Sigma_{\text{амор (1)}} = \frac{\text{ПвОЗ}}{\text{Строк}}, \text{ грн/рік} \quad (1.1)$$

де ПвОЗ – повна вартість основного засобу, грн (таблиця 5.10);

Строк – строк експлуатації основного засобу, рік (таблиця 5.10):

$$\Sigma_{\text{амор (1)}} = \frac{\text{ПвОЗ}}{\text{Строк}} = 2\,500\,000 \text{ (грн/рік);}$$

$$\Sigma_{\text{амор (2)}} = \frac{\text{ПвОЗ}}{\text{Строк}} = 40\,000 \text{ (грн/рік.);}$$

$$\Sigma_{\text{амор (3)}} = \frac{\text{ПвОЗ}}{\text{Строк}} = 35\,000 \text{ (грн/рік.).}$$

Тобто загальна річна сума амортизації складає:

$$2\,500\,000 + 40\,000 + 35\,000 = 2\,575\,000 \text{ (грн.)}$$

Розрахуємо витрати на поточний ремонт згідно формули 1.2:

$$\text{Витр.п.р} = \Sigma z \cdot 2\%, \text{ грн} \quad (1.2)$$

де Σz – загальна сума амортизації, грн (таблиця 5.10).:

$$15\,170\,000 \cdot 2\% = 303\,400 \text{ (грн.)}$$

Маючи усі дані, внесемо в таблицю 5.11 всі витрати і дізнаємось повну собівартість продукції.

Таблиця 5.11 – Кошторис витрат

Калькуляційні статті	Витрати	
	у розрахунку на одиницю продукції, грн.	у розрахунку на весь обсяг продукції, грн.
Сировина та матеріали	2467,78	12 338 900,00
Електропостачання	162,84	814 200,00
Водопостачання	32,91	164 544,00
Теплопостачання	8,904	44 520,00
Інші		
Разом	204,654	13 362 164,00
Заробітна плата основних виробничих працівників	329,47	1 647 360,00
ЄСВ 22%	72,48	362 419,20
Амортизація	515	2 575 000,00

Продовження таблиці 5.11

Витрати на утримання та	60,68	303 400,00
-------------------------	-------	------------

експлуатацію основних засобів поточний ремонт		
Загально виробничі витрати	329,47	1 647 360,00
Виробничі собівартість	1 307,1	6 535 539,20
Адміністративні витрати	329,47	1 647 360
Повна собівартість	4 309,01	21 545 063,2

Розрахунок фінансового результату згідно отриманих даних наведений в таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 - Розрахунок фінансового результату

№ періоду	Обсяги виробництва (послуг)	Обсяги реалізації	Залишок нереалізованої продукції	Ціна	Дохід	Витрати	
1 квартал	1250	1000	250	16 300,00	16 300 000	1 077 252,50	1
2 квартал	1250	1150	350	16 300,00	18 745 000	1 508 153,50	1

Продовження таблиці 5.12

3 квартал	1200	1100	450	16 300,00	17 930 000	1 939 054,50	1
4 квартал	1300	1150	600	16 300,00	18 745 000	2 585 406,00	1
Разом	5 000	4 400					

Таким чином можна зробити висновок, що наше підприємство не потребує брутто-інвестицій.

ВИСНОВКИ

Отже було встановлено, що на параметри турбіни, зокрема на ККД, впливає багато факторів, таких як температура газу на вході в турбіну, витрата охолоджуючого газу через турбіну, радіальні зазори, площі мінімального прохідного перетину соплових апаратів, частота обертання роторів, плавність газоповітряного тракту (присутність або відсутність зустрічних уступів), герметичність проточного тракту, прямолінійність кромek лопаток, шорсткість трактових елементів, тощо.

Знос кінцевої (торцевої) поверхні робочої лопатки ТВТ є основною причиною збільшення радіального зазору між ротором і статором. Знос ротору призводить до збільшення робочого зазору, зниження ККД, збільшення витрати палива двигуна. Знос корпусу найчастіше буває місцевим (обумовленим неідеальною формою деталі) і зазвичай не має таких значних наслідків для ефективності турбіни.

Основними ущільнювальними покриттями, які використовують в турбінах вітчизняних ГТД, є АНБ, КНА, 20Б, АЛК, термографіт-тальк, М-427.25, Л63 (латунь).

Основними методами нанесення ущільнювальних покриттів на статорні деталі турбін вітчизняних ГТД є газополум'яний, плазмовий та метод надзвукового напилення HVOF(HIGHVELOCITYOXYGENFUEL).

З порівняльних досліджень можна зробити висновок про те, що найбільш оптимальним та економічно вигідним є нанесення покриття КНА плазмовим способом.

Наведено техніко-економічне обґрунтування щодо вибору оптимального ущільнювального покриття та методу його нанесення.

Був проведений аналіз потенційних небезпек на виробництві та визначені заходи по забезпеченню техніки безпеки, пожежної безпеки,

безпеки в надзвичайних ситуаціях та заходи щодо виробничої санітарії і гігієни праці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Lattime S. B., Steinetz B. M. High-pressure-turbine clearance control systems: current practices and future directions // Journal of propulsion and power. – 2004. №. 2. – P. 302-311
2. Matthias Neef, Eric Sulda, Norbert Surken, Jan Walkenhorst. Design features and performance details of brush seals for turbine applications. ASME Paper No. GT2006-90404. Proceedings of Rower for Land, Sea and Air, Barcelona, Spain, May 8-11, 2006. –P. 1-8.
3. Lattime S. B., Steinetz B. M. High-pressure-turbine clearance control systems: current practices and future directions. Journal of propulsion and power. – 2004. №. 2. – P. 302-311.
4. О.М. Дубовий, А.М. Степанчук Технологія напилення покриттів: Підручник.- Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.
5. В.М. Корж, В.Д. Кузнєцов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко; за ред. К.А. Ющенко Нанесення покриття: Навч. посібник. К.: Арістей, 2005.– 204 с.
6. Stringer J., Marshall M. B. High speed wear testing of an abradable coating. Wear. 2012. T. 294. P. 257-263.
7. Зорін В.А. Досвід застосування композиційних матеріалів у виробках авіаційної і ракетно космічної техніки // Конструкції з композиційних матеріалів. 2011. № 4.
8. Gao S. et al. Tribological behaviors of turbofan seal couples from friction heat perspective under high-speed rubbing condition. Friction. 2016. T. 4. №. 2. P. 176-190.
9. Chivavibul P., Watanabe M., Kuroda S. Development of WC–Co Coatings Deposited by Warm Spray Process. J. of Thermal Spray Technology. 2008. V. 17, Issue 5-6. P. 750–756.
10. Hajmrle K., Fiala P., Chilkowich A.P., Shiembob L.T. Abradable Seals for Gas Turbines and Other Rotary Equipment. ASME Turbo Expo 2004:

Power for Land, Sea, and Air. Volume 4: Turbo Expo 2004. Vienna, Austria, June 14–17, 2004. pp. 673-682.

11. Єфімов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кирилов В.Н. Дослідження полімерних конструкційних матеріалів при впливі кліматичних факторів і навантажень в лабораторних і натурних умовах // Праці ВІАМ. 2013. № 1. С. 5.

12. Murzin S. P. Exposure to laser radiation for creation of metal materials nanoporous structures. Optics & Laser Technology. 2013. P. 509-512.

13. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегія розвитку композиційних і функціональних матеріалів. // Авіаційні матеріали та технології. 2012. №S. С. 231-242.

14. Chivavibul P., Watanabe M., Kuroda S. Development of WC–Co Coatings Deposited by Warm Spray Process. J. of Thermal Spray Technology. 2008. V. 17, Issue 5-6. P. 750–756.

15. Веселов С.І., Карташов Г.Г. Композиційні матеріали в авіадвигунобудуванні. Куйбишев: Куаі. 1986. 112 с.

16. Murzin, S.P. Local laser annealing for aluminium alloy parts. Lasers in Engineering. 2016. Vol. 33(1-3). P. 67-76.

17. Каблов Е.Н. Стратегічні напрямки розвитку матеріалів і технологій їх переробки на період до 2030 року. // Авіаційні матеріали та технології. 2012. №S. С. 7-17.

18. Маткова А.В., Матвійчук А.В. Металеві сплави для виготовлення авіаційної техніки. Наукові нотатки. 2010. №29. С. 121–122.

19. Beaupain O., Jeunechamps P. P., Ponthot J. P. Numerical simulation of blade/casing rub interaction. European Workshop on New Aero Engine Concepts, Munich. 2010. T. 30.

20. Кшнякін А.М., Пушкіна Г.І., Веселов С.І., Кочерженко В.А. Інформаційний листок №459-73. Куйбишев: ЦНТИ. 1973.

21. d'Oliveira A., Vilar R., Feder C. G. High temperature behaviour of plasma transferred arc and laser Co-based alloy coatings. Applied Surface Science.

2002. №. 1-4. P. 154-160.

22. Murthy J.K.N., Venkataraman B. Abrasive wear behaviour of WC–Co–Cr and Cr_3C_2 –20(NiCr) deposited by HVOF and detonation spray processes. *Surface and Coatings Technology*. 2006. V. 200. Issue 8. P. 2642–2652.

23. Wang Y. et al. Adhesion to Substrate and Friction and Wear Behavior of Ni Alloy-Based Self-Lubricating Composite Coatings Prepared by High Velocity Oxygen Fuel Spraying [J]. *Materials Protection*. 2009. T. 10. C.22.

24. Irissou E., Dadouche A., Lima R. S. Tribological Characterization of plasma-sprayed Co-Ni-Cr-Al-Y-BN abradable coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2014. T. 23. №. 1-2. P. 252-261

25. НПАОП.0.00-7.11-12.

Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників в. [Чинний від 2012-03-16] / Вид. офіц. Київ : МНС України, 2012. 37с.

26. ДСН 3.3.6.042-99

«Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [Чинний від 1999-12-01] / Вид. офіц. Київ: Главсанврач України, 1998. 24с.

27. НПАОП 27.4-7.15-86. Огородження рухомих частин устаткування. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 1988-01-01] /. Вид. оф. Москва, 1988. 19с.

28. ДБНВ.2.5-28-2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. [Чинний від 2006-05-38] / Вид. офіц. Київ, 2006. 13с.

29. НАПБ.А.01.001-2014. «Правила пожежної безпеки в Україні» / Вид. Форт, 2016. 124с.