

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний факультет
(повне найменування факультету)

Технологія машинобудування
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

другий (магістерський)

(ступінь вищої освіти)

на тему «Удосконалення фінішного етапу виготовлення лопаток турбіни ГТД»

Виконав: студент(ка) II курсу, групи М-113м

Спеціальності 131 «Прикладна механіка»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

«Технології машинобудування»

КУШНІР С.В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ГОНЧАР Н.В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент МАТЮХІН А.Ю.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Машинобудівний
Кафедра «Технологія машинобудування»
Ступінь вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 131 «Прикладна механіка»
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) «Технології машинобудування»
(назва освітньої програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри С.І. ДЯДЯ

« _____ » _____ 20__ року

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

КУШНІРА Євгенія Віталійовича

(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Удосконалення фінішного етапу виготовлення лопаток турбіни ГТД

керівник проєкту (роботи) ГОНЧАР Н.В., канд. техн. наук, доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «29»10.2024 року №443

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 12.12.24.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) фінішний етап базового ТП виготовлення лопаток турбіни ГТД; партія лопаток 800 шт.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Аналіз методів фінішної обробки лопаток; 2 Методика проведення експериментів; 3 Експериментальні дослідження якості лопаток в залежності від виду фінішної обробки; 4 Оцінка очікуваної економічної ефективності заходів; 5 Охорона праці; 6 Технологічні рекомендації щодо використання віброобразивного галтування лопаток турбіни з матеріалів ЖС26-ВІ, ЖС32-ВІ, ВТ-3, ВТ-8

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація доповіді 23 слайда

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3, 5-6	ГОНЧАР Н.В., доцент		
4	ПУХАЛЬСЬКА Г.В., доцент		
Нормоконтроль	ДЯДЯ С.І., доцент, зав. Каф.		

7. Дата видачі завдання « 02 » 09 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Огляд методів фінішної обробки	30.09.2024	
2	Методика проведення експериментів	07.10.2024	
3	Експериментальні дослідження якості лопаток в залежності від виду фінішної обробки	31.10.2024	
4	Оцінка очікуваної економічної ефективності заходів	15.11.2024	
5	Охорона праці	21.11.2024	
6	Технологічні рекомендації щодо використання віброабразивного галтування лопаток турбіни з матеріалів ЖС-26ВІ, ЖС32-ВІ, ВТ-3, ВТ-8	25.11.2024	
7	Оформлення пояснювальної записки	27.11.2024	
8	Нормоконтроль	05.12.2024	
9	Рецензія	13.12.2024	
10	Захист дипломного проєкту		

Студент(ка)

_____ (підпис)

Євгеній *КУШНІР*

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ (підпис)

Наталя *ГОНЧАР*

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 88 с., 42 рисунка, 12 таблиць, 42 посилання.

ВІБРО-АБРАЗИВНЕ ГАЛТУВАННЯ, ЖАРОМІЦНЕ ПОКРИТТЯ, ЛОПАТКА, НАПОВНЮВАЧ, ТУРБІНА, ОБРОБКА, ПОЛІРУВАННЯ, ШОРСТКІСТЬ

Об'єктом дослідження є технологічний процес, а саме його фінішний етап, виготовлення лопаток турбіни газотурбінного двигуна (ГТД).

Предмет дослідження – технологічні параметри фінішних операцій, показники продуктивності і якості фінішної обробки поверхонь лопаток.

Метою дипломного проекту є удосконалення фінішного етапу технологічного процесу (ТП) виготовлення лопаток турбіни за допомогою віброабразивного галтування для підвищення продуктивності і видалення ручної праці з фінішних операцій.

Методи дослідження – експериментально-аналітичний.

В магістерській роботі проаналізовані фінішні методи обробки для лопаток турбіни ГТД, які здатні продуктивно обробляти криволінійні аеродинамічні поверхні лопаток, враховуючі особливості їх конструкції; запропоновано обладнання і методику віброабразивного галтування з вибором наповнювачів для галтувальних установок, які в свою чергу впливають на якість обробленої поверхні; проведено експерименти на натурних лопатках турбіни, порівняно базове ручне полірування та галтування, обрано раціональні режими обробки з урахуванням товщини жароміцного покриття лопаток турбіни ГТД; проведено економічний розрахунок – економічний ефект від удосконалення ТП склав 1,2 млн. грн на партію 800 лопаток, умовний час фінішної операції зменшився в 5...8 разів, розроблені технологічні рекомендації.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	7
Вступ.....	8
1 Аналіз методів фінішної обробки лопаток	9
1.1 Особливості виробництва авіаційних лопаток	9
1.2 Використання покриттів в машинобудуванні.....	12
1.3 Аналіз методів фінішної обробки криволінійних поверхонь лопаток.....	17
1.3.1 Електрополірування.....	18
1.3.2 Притирання.....	22
1.3.3 Суперфініш.....	24
1.3.4 Тонке шліфування.....	26
1.3.5 Ультрозвукова обробка.....	28
1.3.6 Стрічкове полірування.....	30
1.3.7 Вібраційна обробка (галтування).....	32
1.3.7.1 Вібраційна обробка за допомогою обладнання RÖSLER ...	33
1.3.7.2 Віброабразивна обробка за допомогою вібраційних установок U – подібної форми.....	35
1.4 Види наповнювачів.....	36
2 Методика проведення експериментів.....	40
2.1 Зразки для проведення експериментів.....	40
2.2 Методика ручного полірування.....	43
2.3 Устаткування для автоматичного вібраційного галтування.....	44
2.4 Методика визначення шорсткості.....	50
2.5 Методика визначення товщини покриття.....	51
3 Експериментальні дослідження якості лопаток в залежності від виду фінішної обробки.....	53
3.1 Ручне полірування лопаток.....	53

3.2 Галтування лопаток.....	54
4 Оцінка очікуваної економічної ефективності заходів.....	66
5 Охорона праці.....	73
5.1 Вступ.....	73
5.2 Небезпека, пов'язана з виробничим пилом.....	73
5.3 Надзвичайні ситуації, пов'язані з пилом.....	76
5.4 Заходи безпеки.....	78
6 Технологічні рекомендації щодо використання віброабразивного галтування лопаток з матеріалів ЖС26-ВІ, ЖС32-ВІ, ВТ-3, ВТ-8	79
Висновки.....	80
Перелік джерел посилання.....	83

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АХП – Антикоровізне хімічне покриття

ВСДП–11 – Високотемпературне силікатне дифузійне покриття

ВТ – Високоміцний титан

ГДК – Гранично допустима концентрація

ГЗП – Гальванічно-захисне покриття

ГТД – Газотурбінний двигун

ЖС – Жароміцний сплав

ЗП – Захисне покриття

ККД – Коефіцієнт корисної дії

МСМ – Молібденове покриття

ННП – Нікелево-нікелеве покриття

ПТМ – Покриття термостійке металеве

СДП–2 – Силікатне дифузійне покриття

СНП – Силікатне покриття

Ст. – Ступінь

ТВ – Технологічні вимоги

ТВТ – Турбіна високого тиску

ТП – Титанове покриття

ТМ – Комбіноване термостійке покриття

ТП – Технологічний процес

ХП – Хромове покриття

ЦП – Цинкове покриття

ВСТУП

Для авіаційних та ракетно-космічних підприємств важливими є багато різних факторів, без яких неможливо виготовити деталь високої якості. З кожним роком зростають вимоги до підвищення якості поверхні деталей, що потребує проведення сучасних досліджень у сфері машинобудування та авіації. Особлива увага приділяється застосуванню новітніх матеріалів і технологій обробки, що дозволяють зменшити вагу конструкцій, підвищити їх міцність і довговічність, а також забезпечити стійкість до екстремальних температур і навантажень. Паралельно з цим активно розвиваються технології що суттєво впливають на якість поверхні, зокрема технології фінішної обробки. Не менш важливими є і технології контролю якості поверхні, такі як радіографічні технології, термографічні, оптичні та багато інших методів неруйнівного контролю, що гарантують надійність та безпеку кожного елемента виробу, і дозволяють досягати високих показників контролю якості і точності, що на етапі фінішної обробки не можна переоцінити.

Саме потреба високої якості поверхні є одним із найважливіших критеріїв при виборі методу фінішної обробки, особливо при роботі з авіаційними компонентами. Фінішна операція вимагає не тільки ретельного контролю шорсткості під час кожного етапу, а й належної підготовки матеріалів, інструментів та вибору раціональних режимів обробки. Для досягнення необхідної якості поверхні застосовуються спеціальні методи шліфування, полірування, галтування, можлива також електрохімічна, термічна, ультразвукова обробка, використання віброустановок та інших методів обробки, які дозволяють отримати необхідний рівень якості поверхні. Це важливо для підвищення експлуатаційних властивостей виробу, зниження тертя, забезпечення щільності з'єднань, а також для покращення аеродинамічних властивостей у авіаційних та космічних деталях.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ЛОПАТОК

1.1 Особливості виробництва авіаційних лопаток

Лопатки [1] (рисунок 1.1) є одними з найважливіших компонентів газотурбінних двигунів, що використовуються в авіаційній промисловості. Вони виконують складні функції, пов'язані з перетворенням енергії палива на механічну або кінетичну енергію, яка забезпечує рух літального апарату. Лопатки можуть бути частинами різних елементів двигуна, таких як компресори, турбіни або вентилятори, і кожен тип лопаток має свою специфіку щодо конструкції та матеріалів.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд лопаток [2]

Лопатки, що використовуються в авіаційних двигунах, мають витримувати екстремальні умови експлуатації. Вони піддаються впливу дуже високих температур, інтенсивного тиску та значних механічних навантажень. У турбіні, наприклад, температура газів може досягати понад 1000 °С, що ставить високі вимоги до термостійкості матеріалів, з яких виготовляються лопатки. Крім того, лопатки працюють на високих швидкостях обертання, що

призводить до появи відцентрових сил і додає додаткові вимоги до їх міцності та аеродинамічних властивостей.

Матеріал, з якого виготовляються авіаційні лопатки, має вирішальне значення для їхньої довговічності та ефективності. Лопатки працюють при екстремальних температурах, великих механічних навантаженнях і під впливом агресивних хімічних середовищ, що вимагає від матеріалу особливої стійкості. Зазвичай для виробництва лопаток використовують високоміцні сплави на основі титану, нікелю або кобальту, які можуть витримувати ці умови, зберігаючи свою структурну цілісність протягом тривалого часу. Один з найважливіших аспектів при виборі матеріалу для авіаційних лопаток – це його здатність витримувати високі температури. Сплави на основі нікелю, що часто використовуються в авіаційній промисловості, мають високу жаростійкість і здатні функціонувати в умовах перегріву, що є критично важливим для роботи турбінних двигунів. Крім того, ці матеріали часто мають покращену зносостійкість, що дозволяє лопаткам ефективно витримувати механічні навантаження, пов'язані з їх обертанням на високих швидкостях. Окрім теплових і механічних характеристик, матеріал лопаток також має бути стійким до корозії, особливо в умовах роботи двигунів на великих висотах, де існує підвищений рівень вологості та інші агресивні фактори. Тому для таких ситуацій часто вибирають матеріали з покращеними антикорозійними властивостями, що дозволяє забезпечити надійність і довговічність деталей навіть у суворих експлуатаційних умовах. Покращують ці та інші властивості лопаток покриття (п.1.2).

Для виготовлення лопаток авіаційних двигунів використовуються складні технології обробки. Одним із найбільш ефективних методів є точне лиття, що дозволяє створювати деталі з високою точністю та складною геометрією. Це особливо важливо для лопаток, оскільки навіть найменші дефекти можуть призвести до втрати ефективності або навіть до виведення з ладу двигуна. Крім того, лопатки турбіни часто мають внутрішні канали для охолодження, що дозволяє підтримувати оптимальну температуру матеріалу

під час роботи. Конструкція лопаток авіаційних двигунів також має значний вплив на їх ефективність. Важливо, щоб форма лопаток була оптимізована для досягнення високої аеродинамічної ефективності. Для цього проводяться численні аеродинамічні розрахунки та випробування, щоб забезпечити найкраще співвідношення між опором і потужністю. Також важливим аспектом є балансування лопаток з диском, оскільки навіть незначний дисбаланс може призвести до надлишкових вібрацій і, з рештою, до пошкодження двигуна.

Технології виготовлення авіаційних лопаток турбін постійно вдосконалюються. Із розробкою нових матеріалів і розвитком технологій, інженери намагаються зробити ці деталі легшими, міцнішими та більш стійкими до зношування. Зокрема, активно розробляються нові жароміцні матеріали, що дозволяють підвищити ефективність турбін, збільшити їх коефіцієнт корисної дії (ККД), та зменшити витрати пального. Впровадження композитних матеріалів також є перспективною тенденцією, оскільки вони дозволяють значно знизити масу лопаток, що, в свою чергу, покращує не тільки економічні характеристики літаків, а й збільшує дальність польоту, позитивно впливає на маневреність та швидкість і зменшує експлуатаційні витрати. Завдяки постійному вдосконаленню матеріалів і конструкцій авіаційних лопаток, сучасні газотурбінні двигуни стають більш ефективними, потужними та економічними. Це важливо не лише для авіаційної промисловості, а й для зниження екологічного впливу, оскільки вдосконалення лопаток допомагає зменшити витрати пального та викиди шкідливих речовин, що в наш час є однією з актуальніших глобальних проблем.

Однак, незважаючи на всі досягнення, лопатки авіаційних двигунів досі залишаються одними з найбільш складних і дорогих деталей у виробництві двигунів. Висока точність, складні технології та спеціалізовані матеріали роблять цей процес витратним, що впливає на вартість кінцевої продукції. Тим не менш, інвестиції в розробку нових технологій і матеріалів

допомагають досягати позитивних результатів не тільки в авіаційній промисловості, а й в машинобудуванні в цілому, дозволяючи створювати більш ефективні та економічно вигідніші продукти, зокрема авіаційні двигуни.

На тлі постійних інновацій і вдосконалення технологій виробництва, саме авіаційні лопатки залишаються важливим одним із найважливіших об'єктів для досліджень і розвитку. Їхні властивості та конструкція визначають ефективність і надійність газотурбінних двигунів, що є критично важливим для безпеки, доступності і економічності сучасної авіації.

1.2 Використання покриттів в машинобудуванні

Однією з важливих технологій у виготовленні авіаційних лопаток є нанесення різноманітних захисних покриттів. Лопатки взаємодіють між навколишнім середовищем через свої поверхні, до яких висуваються особливі вимоги, які не завжди можуть бути забезпечені властивостями основного матеріалу. Наприклад, певні частини або навіть вся поверхня лопатки може вимагати особливої хімічної стійкості, більш високої зносостійкості, кращої відбивної здатності. Однак буває, що обрані матеріали не достатньо відповідають цим вимогам. У таких випадках, коли виготовлення лопаток з дорогих матеріалів є економічно не вигідним, часто застосовують дешевші матеріали і досягають необхідних властивостей поверхні за допомогою спеціальних покриттів [6, с. 106].

Загалом покриття поділяються на:

- захисні покриття, що забезпечують надійний захист об'єкта при його взаємодії з навколишнім середовищем, захищаючи від агресивних чинників;

- захисно-декоративні покриття, які не тільки покращують захисні властивості, але й поліпшують естетичний вигляд виробу, роблячи його більш привабливим;

- спеціальні покриття, призначені для зміни фізичних властивостей поверхні виробу, таких як підвищення мікротвердості, зміна коефіцієнта тертя, а також оптичних, магнітних, електричних і інших характеристик поверхні;

- відновлювальні покриття, що використовуються для відновлення геометрії та розмірів зношених або дефектних деталей, часто при цьому такі покриття можуть також виконувати і інші функції, зокрема захисні;

- конструкційні покриття, що виконують функцію конструктивного елемента в виробі, такі як тонкоплівкові шари в мікро- та радіоелектроніці, а також резистори. Вони можуть утворювати окремий елемент, наприклад, коркові деталі з тугоплавких матеріалів, що створюються методом напилення;

- технологічні покриття, які не несуть самостійних функцій у готовому виробі, але використовуються на певних етапах виготовлення для полегшення виробничих процесів.

Конкретні приклади таких покриттів [4], [5].

1. ЗП (захисне покриття) – це загальний термін для покриттів, що використовуються для захисту деталей від різних впливів зовнішнього середовища, таких як корозія, зношування або механічні пошкодження. Захисні покриття можуть бути з різних матеріалів, зокрема металеві, пластикові або полімерні, і використовуються залежно від вимог до специфічних умов експлуатації.

2. ГЗП (гальванічно-захисне покриття) – гальванічне покриття застосовується для захисту від корозії та для підвищення зносостійкості деталей. Процес гальванізації включає нанесення металевого шару на поверхню деталі для утворення захисної плівки, яка оберігає її від окислення та механічних пошкоджень.

3. ПТМ (покриття термостійке металеве) – це спеціалізоване покриття, яке забезпечує підвищену термостійкість і механічну міцність. Застосовується на деталях, що працюють при високих температурах, таких як компоненти двигунів, турбін, і інших енергетичних установок, де важливо зберегти структурну цілісність при високих температурах.

4. АХП (антикорозійне хімічне покриття) – покриття, яке створює захисний бар'єр проти корозії на поверхні металевих деталей. Зазвичай наноситься на деталі, що піддаються впливу вологи, кисню або хімічних агресивних середовищ, що може призвести до окислення і зниження міцності матеріалу.

5. КТМ (комбіноване термостійке покриття) – це покриття, що поєднує в собі властивості термостійкості та зносостійкості, часто з додатковими властивостями, такими як підвищена міцність або антикорозійний захист. Зазвичай використовується для деталей, що працюють в умовах високих температур і механічних навантажень, таких як компоненти турбін та двигунів.

6. ННП (нікелево-нікелеве покриття) – це покриття, яке забезпечує високу зносостійкість і корозійну стійкість. Наноситься на деталі, які піддаються агресивному середовищу або високим навантаженням. Нікелево-нікелеве покриття має також здатність витримувати високі температури, тому його часто використовують для деталей, що працюють у складних умовах. Включає в себе антикорозійну та зносостійку функцію.

7. СНП (силікатне покриття) – це покриття, яке наноситься на поверхню для підвищення термостійкості і стійкості до агресивних хімічних середовищ. Силікатні покриття часто використовуються в авіаційній і хімічній промисловості для захисту компонентів від високих температур та впливу агресивних середовищ.

8. ХП (хромове покриття) – це покриття, яке забезпечує високу зносостійкість, корозійну стійкість і надає поверхні блискучий вигляд. Хромові покриття часто використовуються для підвищення довговічності та

покращенню зовнішнього вигляду деталей, що піддаються механічному та хімічному впливу.

9. ЦП (цинкове покриття) – цинкове покриття використовується для захисту металевих деталей від корозії. Воно зазвичай наноситься на сталь або інші металеві матеріали шляхом гальванізації або гарячого занурення. Це покриття утворює захисну плівку, яка оберігає деталі від окислення та інших корозійних процесів.

10. ТП (титанове покриття) – покриття, що забезпечує високу міцність, зносостійкість і термостійкість. Титанові покриття використовуються на деталях, що працюють в умовах екстремальних температур або агресивних середовищ. Вони відрізняються високою стійкістю до корозії та механічних пошкоджень.

11. МСМ (молібденове покриття) – це покриття, яке застосовується для підвищення термостійкості та зносостійкості. Молібденові покриття використовуються для деталей, що працюють при високих температурах, і забезпечують захист від корозії та механічних пошкоджень в агресивних середовищах, таких як високотемпературні установки або реактори.

12. ВСДП-11 (високотемпературне силікатне дифузійне покриття) – це покриття, що використовується для захисту поверхні деталей від корозії та зносу, підвищення їх термостійкості і зносостійкості. Це покриття наноситься на деталі, які піддаються високим температурам і механічним навантаженням. Також воно має декоративну функцію, покращуючи зовнішній вигляд виробу.

13. СДП-2 (силікатне дифузійне покриття) – покриття, яке забезпечує захист деталей від зовнішніх агресивних факторів, підвищує зносостійкість і залежно від типу, може поліпшувати зовнішній вигляд деталей. Це покриття використовують у виробках, де важливі як захист, так і естетичні характеристики.

Серед наведених покриттів для лопаток турбінних двигунів авіаційної промисловості частіше всього використовують ВСДП-11 та СДП-2, оскільки

вони мають спеціалізовані властивості, що критично важливі для умов, в яких працюють ці лопатки. Лопатки турбін працюють в екстремальних умовах, де існують високі температури, механічні навантаження та агресивне середовище. ВСДП-11 забезпечує відмінну термостійкість, зносостійкість та корозійну стійкість, що важливо для захисту від руйнування при високих температурах, що виникають під час роботи двигуна. Крім того, це покриття має декоративну функцію, що покращує зовнішній вигляд виробу, хоча для лопаток цей аспект не є критичним, але може бути застосованим при виготовленні інших авіаційних деталей, де це може бути важливим, наприклад, корпусні деталі. СДП-2 також є ефективним варіантом для лопаток, оскільки це захисно-декоративне покриття забезпечує додатковий захист від зовнішніх агресивних факторів, таких як корозія та механічне зношення. У порівнянні з іншими покриттями, такими як ННП або ПТМ, вищеназвані ВСДП-11 і СДП-2 демонструють кращу комбінацію зносостійкості, термостійкості та захисту від корозії, що робить їх більш придатними для роботи в умовах високих температур і постійного механічного навантаження, характерних для турбінних лопаток. Інші покриття, такі як ЦП або ГЗП, не забезпечують достатнього рівня термостійкості для таких високих температур, тому вони менш придатні для застосування на лопатках, хоча їх переваги, в першу чергу дешевизна, можуть бути використані для інших авіаційних компонентів, з менш суворими вимогами. Таким чином, саме ВСДП-11 і СДП-2 є покриттями базового ТП виготовлення турбінних лопаток серійного виробництва, оскільки вони забезпечують максимальний захист від зносу, корозії та термічних пошкоджень, гарантуючи довговічність і ефективну роботу деталей турбін у складних умовах.

1.3 Аналіз методів фінішної обробки криволінійних поверхонь лопаток

Для забезпечення високої ефективності та надійності роботи турбінних лопаток, важливу роль відіграє не лише їхнє покриття, а й процеси обробки, яким вони піддаються на різних етапах виробництва. Покриття, яке наноситься на лопатки, іноді навіть до половини пера, підвищує їх експлуатаційні властивості. Однак, навіть із найкращими покриттями, інші види фінішної обробки мають покращити характеристики деталі до відповідних вимог, при яких покриття, як єдиний варіант фінішної обробки, може не покращити на достатньому рівні експлуатаційні властивості деталі, або ж не влаштувати економічно. Такі види можуть дозволяти досягти необхідних параметрів деталі, які нададуть можливість працювати в екстремальних умовах та гарантувати надійність компонента протягом всього терміну служби. До того ж фінішними оздоблювально-зміцнювальними операціями забезпечують необхідні властивості поверхонь перед нанесенням покриттів для їх найлипшої остаточної якості.

Фінішна обробка турбінних лопаток є надзвичайно важливою через специфічні умови роботи. Турбінні лопатки працюють при високих температурах, великих швидкостях та в умовах значних механічних навантажень. Фінішна обробка є важливою не лише для підвищення їхньої продуктивності, але й для забезпечення якості поверхні, яка впливає на надійність, довговічність та безпеку роботи [3] двигуна в цілому. Для турбінних лопаток високоякісна обробка поверхні також дозволяє покращити теплопровідність, що є дуже важливим для запобігання перегріву і забезпечення стабільної роботи турбіни.

До фінішних методів обробки лопаток висуваються такі вимоги:

- висока якість поверхні, яка повинна забезпечувати мінімальну шорсткість поверхні, необхідну для покращення аеродинамічних характеристик і зниження тертя;

- усунення мікрodefektів, яка повинна повністю видаляти задирки, подряпини та інші поверхневі дефекти, які можуть стати осередками втомного руйнування;

- стійкість до корозії, а значить і стійкість до появи мікротріщин або дефектів, де і можуть розпочатися корозійні процеси.

Під час виконання фінішної обробки треба враховувати не тільки криволінійність складнопрофільних поверхонь лопатки (аеродинамічних поверхонь корита та спинки пера, ялинкового хвостовика, комлевої частини), а і тонкостінність пера, точність і стабільність обробки вхідних та вихідних крайок. Через це кількість можливих для використання фінішних методів значно скорочується.

Отже, у цьому літературному огляді розглядається такі методи обробки:

- електрополірування;
- притирання;
- суперфініш;
- тонке шліфування;
- ультразвукова обробка;
- стрічкове полірування;
- вібраційна обробка.

1.3.1 Електрополірування

Електрополірування [7] – це електрохімічний метод обробки, що знімає тонкий шар матеріалу з металевої деталі. У результаті процесу поверхня стає блискучою, гладкою і надзвичайно чистою.

Під час електрополірування лопатка виступає як позитивно заряджений анод, який підключається до позитивної клеми випрямляча постійного струму. Негативно заряджений катод, зазвичай виготовлений з нержавіючої

сталі або цирконію, під'єднується до негативної клеми випрямляча. І анод і катод занурюються у ванну з електролітом, температура якого контролюється. Хімічний склад електроліту для електрополірування зазвичай включає в себе густу суміш сірчаної та фосфорної кислот. Електричний струм від випрямляча протікає від анода до катода через електроліт. Завдяки струму іони металу на поверхні деталі окислюються і розчиняються в електроліті. Цей процес дозволяє розчинити дуже малі, чітко контрольовані кількості металу, що забезпечує утворення мікронної товщини поверхні [7].

Процес електрополірування має певні обмеження у вигляді максимально допустимого покращення якості поверхні, яке залежить від попередніх характеристик цієї поверхні. Наприклад, при первинній шорсткості в Ra 3,2, найкращим результатом електролітичного полірування буде шорсткість поверхні в Ra 1,6. Тобто покращення шорсткості можливе тільки біля 50% від попередніх характеристик. Це означає, що електролітичне полірування потребує попередньої обробки для підготовки поверхні перед заданим видом обробки. Це можуть бути як механічні методи, такі як шліфування або полірування, так й інші немеханічні методи, наприклад хімічна обробка та ультразвукове очищення. Також важливим етапом для підготовки до електролітичного полірування можуть бути знежирення та ретельна промивка, щоб уникнути залишків від попередньої обробки, в тому числі хімічної.

Схема електрополірування показана на рисунку 1.2 [8].

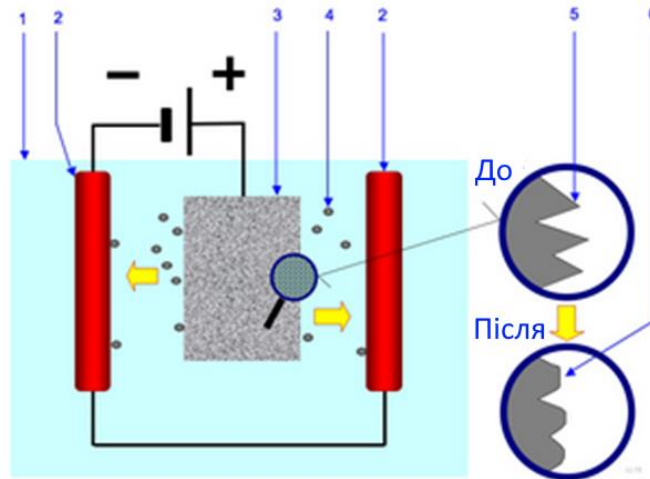
Електрополірування покращує електрофізичні властивості деталей, оскільки зменшується глибина мікротріщин, поверхневий шар не піддається деформації, виключаються ущільнення та термічні зміни в структурі, що в свою чергу підвищує стійкість до корозії [9].

Установка електрополірування показана на рисунку 1.3 [7].

Цей метод обробки має такі переваги:

- створює гладку та чисту поверхню;
- підходить для обробки різноманітних металів;

Схематично зображений процес електрополірування



1 - електроліт; 2 - катод; 3 - деталь для полірування (анод) ; 4 - частинка, що рухається від деталі до катода; 5 - поверхня перед поліруванням; 6 - поверхня після полірування

Рисунок 1.2 - Схема електрополірування

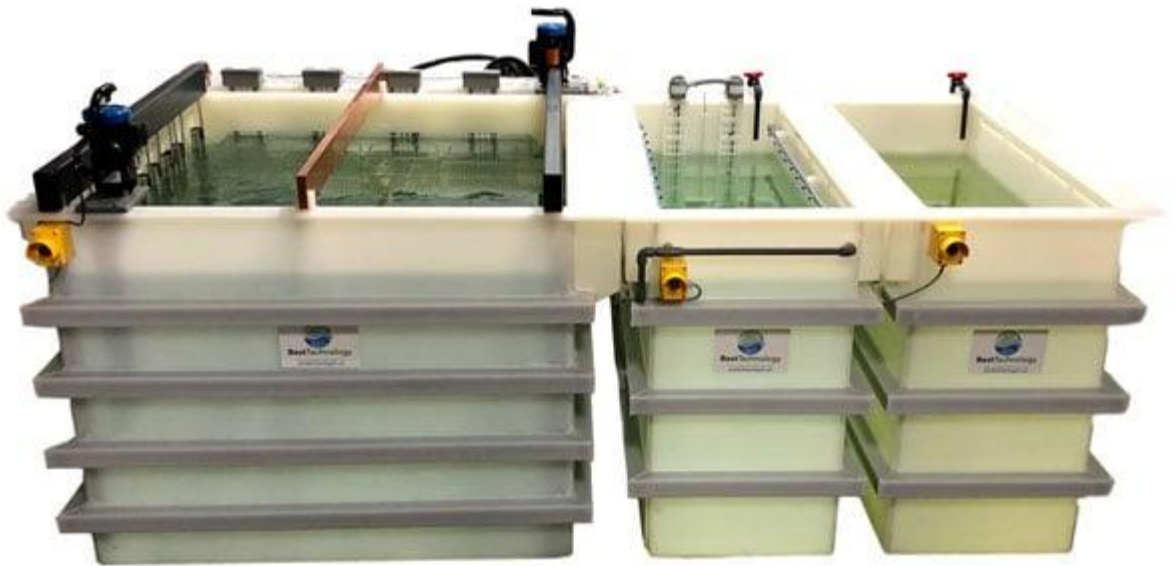


Рисунок 1.3 - Установка електрополірування

- не потребує складного та дорогого обладнання;
- може полірувати ділянки, до яких важко дістатися іншими методами обробки;

- при застосуванні електрохімічних методів деталей майже не зазнає ніяких зовнішніх механічних сил, які утворюються під час механічної обробки, і саме тому поверхня заготовки не зазнає будь-яких фізичних ушкоджень, що можуть призвести до значного погіршення якості поверхні і експлуатаційних властивостей в цілому;

- електрохімічні методи є найбільш ефективними для обробки високолегованих жароміцних і нержавіючих сталей, твердих сплавів, титанових і магнієвих сплавів, які найчастіше використовуються для виготовлення деталей авіаційної техніки, зокрема лопаток.

Серед недоліків цього методу обробки слід зазначити наступне:

- електрополірування вимагає суворого контролю за режимами обробки, такими як, напруга, температура електролітичної рідини та поверхні заготовки, густина струму. Так як навіть невеликі відхилення можуть призвести до нерівномірного полірування або пошкодження поверхні;

- неможливість обробки деяких матеріалів деталей через корозійну дію та можливість зміни хімічного складу тонкого поверхневого шару лопатки;

- додаткові витрати на електроенергію для проведення електролізного процесу;

- шкідливість для екосистеми, випарування нагрітих кислот, необхідність і дороговизна утилізації.

В залежності від конкретного виду електролітичної обробки, вона використовується при виконанні таких робіт як калібрування, контурна обробка, видалення задирок, заокруглення кромки, гостріння, обробка фасонних поверхонь, відрізання, кільцеве вирізування, обробка канавок тощо. А точність такої обробки в середньому така [10, с. 47] - електролітичне полірування дозволяє без особливих зусиль досягати точності до 0,1 мм, з шорсткістю Ra 0,32-0,63. А при наявності сучасного обладнання і технологій, точність обробки і якість поверхні може бути кращою в рази, що вкрай важливо при обробці деталей авіаційної техніки [11, с. 86].

Отже, електрополірування, хоча і створює гладку та чисту поверхню, не є ефективним для обробки лопаток газотурбінних двигунів (ГТД). Це обумовлено обмеженням у покращенні шорсткості поверхні, складністю контролю режимів процесу та ризиком нерівномірного полірування, що може призвести до пошкодження деталей; до того ж в дрібних рисках, або у важкодоступних місцях можуть залишатися остаточні речовини з кислотного електроліту, який не видалився під час мийки, і які є висококородійними речовинами. Враховуючи наявність перфорованих отворів в лопатках турбіни використання цього методу для таких лопаток не є доцільним.

1.3.2 Притирання

Притирання [12] – це операція, що виконується з використанням подрібненого порошку і пасти для досягнення високої точної поверхні і щільного прилягання деталей, які найчастіше використовуються для герметичних з'єднань.

Процес виконується за допомогою притиру відповідної геометричної форми, на поверхню якого наносять притирочну пасту або дрібнозернистий абразивний порошок зі сполучною рідиною. Матеріал притиру, як правило, повинен бути м'якшим за оброблюваний матеріал. Абразивні частинки в пасті або порошку впроваджуються в поверхню притиру та утримуються на ній, але таким чином, щоб під час відносного руху кожне абразивне зерно знімало мінімальну кількість матеріалу. Тому притир можна розглядати як високоточний абразивний інструмент. Заготовка або притир повинні здійснювати різноспрямовані рухи. Найкращого результату досягають, коли траєкторія руху кожного абразивного зерна не повторюється. Абразивна чистова обробка відбувається завдяки зняттю мікронерівностей з поверхні заготовки під час її відносного переміщення вздовж притирочної поверхні.

Під впливом абразивних зерен мікронерівності згладжуються внаслідок комбінованої дії хімічних і механічних процесів на поверхні деталі [12].

Цей метод обробки має такі переваги:

- покращує чистоту поверхні заготовки за рахунок зменшення поверхневих виступів і западин матеріалу;
- процес притирки збільшує термін служби сполучених деталей за рахунок зменшення тертя між ними;
- покращує геометричні параметри та розміри заготовки, забезпечуючи ідеальну посадку між деталями;
- в процесі обробки в поверхні заготовки не виникає термічних напружень через мінімальне виділення тепла.

Серед недоліків цього методу обробки можна виокремити наступне:

- процес зазвичай не автоматизований, що збільшує трудомісткість, вимагає досвідченого робітника-притиральника і підвищує витрати на виробництво;
- абразивні частинки можуть проникати в поверхневий шар деталі, цей процес називається шаржування, що з часом може призвести до її пошкодження;
- процес зняття металу відбувається дуже повільно, що робить обробку тривалою та знижує продуктивність;
- притирка є затратним процесом через значне споживання абразивних матеріалів.

Притиральний верстат показаний на рисунку 1.4 [13].

Отже, притирання, хоч і забезпечує високу точність обробки та чистоту поверхні, але не є ефективним для обробки лопаток газотурбінних двигунів (ГТД). Процес є трудомістким, повільним і неавтоматизованим, що суттєво знижує продуктивність і збільшує витрати. Крім того, складність рухів при обробці, ризик проникнення абразивних частинок у поверхневий шар може призвести до пошкоджень деталей у процесі експлуатації, що робить цей метод недоцільним для таких деталей.

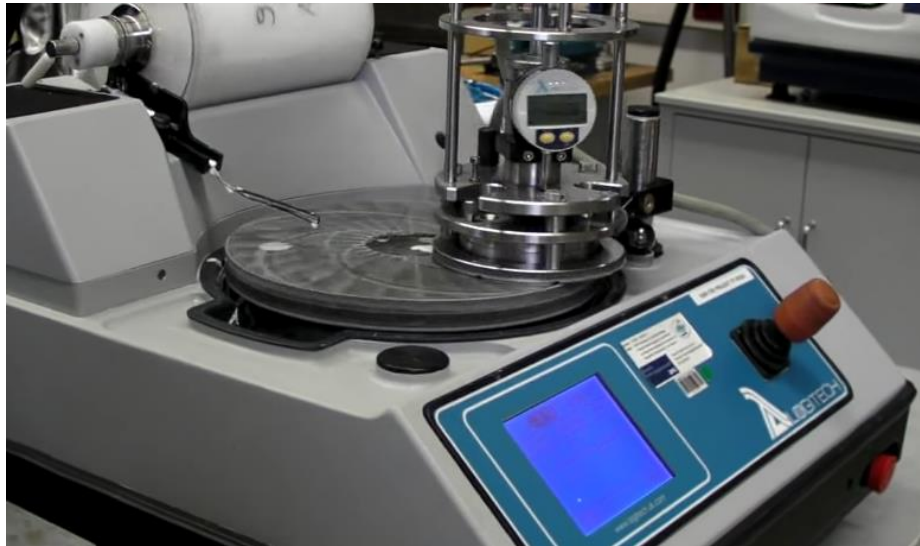


Рисунок 1.4 – Притиральний верстат

1.3.3 Суперфініш

Суперфінішна обробка, відома також як мікрофініш або короткохідне хонінгування – це метод обробки металів, який покращує чистоту поверхні та геометричні параметри заготовки. Процес полягає у видаленні тонкого поверхневого шару, що складається з фрагментованого або деформованого металу, утвореного під час попередньої обробки. Для цього використовують абразивний камінь або стрічку. Товщина цього шару зазвичай не перевищує 1 мкм [14].

Після того, як металеву деталь відшліфовано до базової якості, її обробляють дрібнішим абразивним каменем. Камінь (або стрічка) здійснює коливальні або обертальні рухи, поки заготовка переміщується так, що кожне абразивне зерно рухається випадковими шляхами, змінюючи швидкість, напрямок та тиск [15]. Цей багатофункціональний рух є ключовою особливістю суперфінішної обробки, оскільки він запобігає утворенню нерівномірного покриття, яке виникає через накопичення матеріалу на краях. Отже, суперфінішна обробка схожа на притирку, але із закріпленням

абразивним каменем, а не вільними чи вбудованими абразивними зернами [14].

Результати такої суперфінішної обробки зі схематичною профілограмою можна побачити на рисунку 1.5 [12].









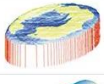







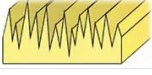
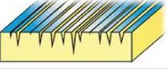
	Жорстке точіння/шліфування	Superfinish (від Supfina)
 Округлість		
 прямиливість		
 площинність		
 Циліндричність		
 Глибина шорсткості		
 Матеріальне наповнення		

Рисунок 1.5 – Схема поверхонь до і після суперфінішної обробки

Цей метод обробки має такі переваги:

- покращена обробка поверхні;
- стійкість до втоми;
- підвищена довговічність деталей;
- більш жорсткі допуски.

Серед недоліків цього методу обробки можна виокремити наступне:

- суперфінішування характеризується меншою продуктивністю різання через мінімальний об'єм стружки та низьку швидкість зняття матеріалу;
- цей процес може бути витратним через тривалий час обробки та необхідність використання додаткового обладнання;
- на відміну від полірування, поверхня оброблених металевих деталей не набуває дзеркального блиску, навіть якщо має високу якість;
- використовувані інструменти м'які та швидше зношуються.

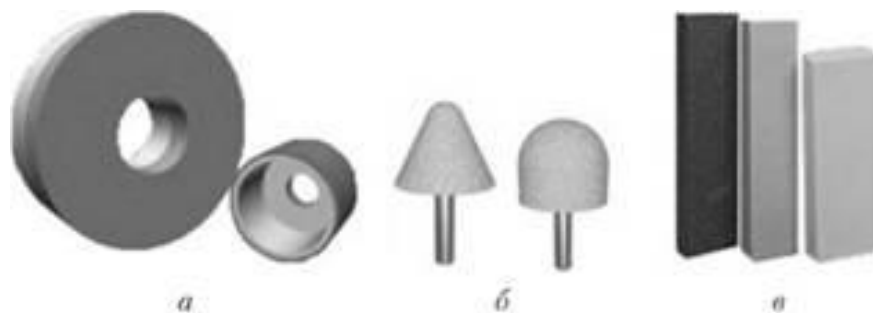
Отже, суперфінішна обробка, хоча і покращує чистоту поверхні та підвищує довговічність деталей, але не є ефективним методом для обробки лопаток газотурбінних двигунів (ГТД). Процес має низьку продуктивність

через мінімальний об'єм зняття матеріалу, складні рухи, тому потребує тривалого часу обробки. Крім того, вартість додаткового обладнання та швидке зношення інструментів роблять цей метод економічно не вигідним для складних і високоточних компонентів, таких як авіаційні лопатки.

1.3.4 Тонке шліфування

Тонке шліфування – це метод абразивної обробки, що передбачає використання обертового диска з абразивними зернами для зняття матеріалу з поверхні заготовки. Абразивні частинки виконують роль мікроскопічних ріжучих елементів, які видаляють тонкі шари матеріалу, надаючи виробу необхідної форми й розмірів. На відміну від звичайного шліфування, тонке шліфування виділяється ще меншим об'ємом матеріалу що видаляється, більшою точністю самого абразивного інструмента [16].

Абразивний інструмент для тонкого шліфування показаний на рисунку 1.6.

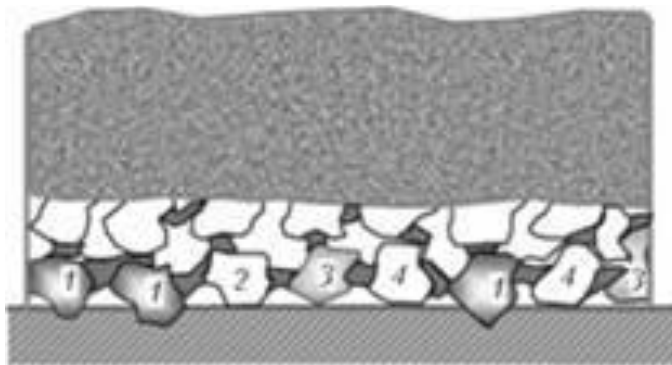


а - кружки; б - головки; в - бруски.

Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд абразивного шліфувального інструмента

Різниця між тонким шліфуванням та іншими методами полягає у розмірі видаленого матеріалу. Тому, завдяки меншим припускам на обробку, порівняно з більш грубими методами, процес тонкого шліфування забезпечує ще більшу високу точність розмірів, і ще кращу шорсткість поверхні деталі [16]. Тонке шліфування вирізняється своєю здатністю поєднувати високу швидкість видалення матеріалу з досягненням точних розмірних допусків. Цей процес зазвичай застосовують як завершальний етап після грубішої обробки, або навіть після звичайного шліфування щоб досягти ідеальної поверхні та точних геометричних параметрів.

Структуру абразивного шліфувального інструменту показано на рисунку 1.7 [17].



1 - абразивні зерна, що здійснюють різання; 2 - зерна, що здійснюють пластичне відтискування; 3 - зерна, що не беруть участі в роботі, поки не будуть відпрацьовані попередні зерна; 4 - зерна, що створюють пружне відтискування.

Рисунок 1.7 - Структура абразивного шліфувального інструменту

Тонке шліфування, хоча й забезпечує високу точність обробки та якість поверхні, не є оптимальним методом для обробки лопаток газотурбінних двигунів (ГТД). Процес має низьку продуктивність через мінімальний обсяг зняття матеріалу і тривалий час обробки. Крім того, він є економічно

невигідним через необхідність високоточного обладнання та обмежену адаптивність до складної геометрії авіаційних лопаток.

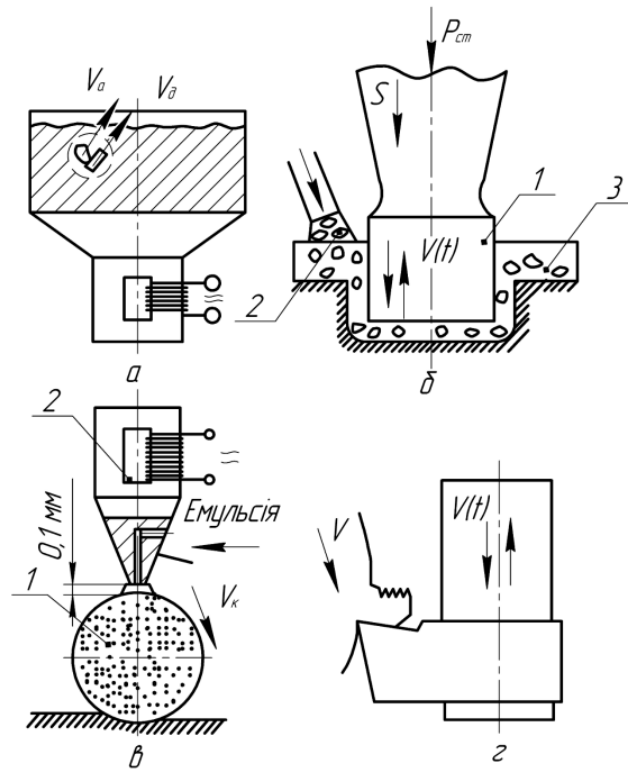
1.3.5 Ультразвукова обробка

Ультразвукові методи обробки базуються на застосуванні енергії ультразвукових коливань із частотою 18–44 кГц та інтенсивністю 10 Вт/см². Джерелом ультразвукових коливань виступають п'єзокерамічні або магнітострикційні перетворювачі, які приводяться в дію за допомогою ультразвукового генератора. На рисунку 1.8 представлені різновиди ультразвукової обробки [10, с. 48].

Перспективним є застосування ультразвуку для чистової поверхнево-зміцнювальної обробки деталей. Ультразвуковий вплив зменшує опір поверхневих шарів металу до пластичної деформації, що дозволяє при незначному статичному зусиллі досягати суттєвої деформації. Це відкриває можливість ефективно обробляти тонкостінні деталі та деталі з м'якими покриттями.

Продуктивність і якість обробки поверхні залежать від властивостей матеріалу, амплітуди коливань, зернистості абразиву та статичного навантаження. Продуктивність процесу пропорційна квадрату критерію крихкості. Продуктивність зростає зі збільшенням амплітуди, частоти коливань і зернистості абразиву, але має оптимальне значення, при якому досягається максимальний результат. Ультразвуковий метод використовується для обробки зовнішніх і внутрішніх поверхонь деталей із твердих крихких матеріалів (кераміка, скло, кварц). Його перевага перед електроерозійним і електрохімічним методами полягає у здатності обробляти діелектрики, а також у вищій якості поверхневого шару при роботі з тугоплавкими металами та твердими сплавами. Для підвищення

продуктивності, особливо при обробці глибоких отворів, застосовується підведення абразивної суспензії під тиском або її вакуумне відсмоктування.



а - обробка із застосуванням незакріпленого абразиву для видалення дрібних задирок (менше 0,1 мм) і шліфування невеликих деталей; б - розмірна обробка твердих і крихких матеріалів за допомогою абразивної суспензії; в - очищення та змазування робочої поверхні круга під час чистового шліфування в'язких матеріалів; г - передача вимушених ультразвукових коливань малої амплітуди різальним інструментом для підвищення ефективності стандартних процесів різання важкооброблюваних матеріалів.

Рисунок 1.8 - Різновиди ультразвукової обробки

Ультразвуковий метод обробки не є ефективним для лопаток газотурбінних двигунів, особливо тих, що мають спеціальні отвори. Через складну геометрію та наявність вузьких і глибоких каналів досягнення рівномірної обробки всієї поверхні є ускладненим, а ризик пошкодження внутрішніх елементів або неякісної обробки зростає. Крім того, висока

точність, необхідна для таких деталей, не завжди може бути гарантована при застосуванні цього методу.

1.3.6 Стрічкове полірування

Стрічкове полірування – це процес обробки поверхні металевих, дерев'яних або інших матеріалів за допомогою абразивних стрічок, який дозволяє досягти гладкого, блискучого або дзеркального ефекту. Цей метод широко використовується для видалення нерівностей, подряпин, окалини, іржі або інших дефектів, а також для покращення зовнішнього вигляду та функціональних характеристик виробів. Процес починається з підготовки поверхні, яка очищається від бруду, масла та інших забруднень, а іноді попередньо шліфується для видалення грубих дефектів. Потім використовуються абразивні стрічки різної зернистості, які закріплюються на спеціальному обладнанні, такому як стрічкові шліфувальні машини або полірувальні верстати. Зернистість стрічки вибирається залежно від стану поверхні та бажаного результату. Під час обробки стрічка рухається з високою швидкістю, і за допомогою тиску або контакту з поверхнею видаляються нерівності та дефекти. Поступово використовуються стрічки з меншою зернистістю для досягнення гладкого ефекту, а на завершальному етапі можна застосовувати полірувальні пасти або спеціальні стрічки для надання поверхні дзеркального блиску.

Одним із ключових застосувань стрічкового полірування є обробка лопаток авіаційних двигунів. Полірування лопаток дозволяє не лише покращити їх зовнішній вигляд, але й значно підвищити їх експлуатаційні властивості. Гладка поверхня зменшує опір повітряного потоку, що покращує ефективність роботи двигуна та знижує витрату палива [3]. Крім того, полірування допомагає усунути мікротріщини та нерівності, які можуть стати

місцем концентрації напружень і призвести до руйнування матеріалу під час експлуатації. Таким чином, стрічкове полірування є важливим етапом у виробництві та обслуговуванні авіаційних двигунів, забезпечуючи їхню надійність та довговічність [18, с. 97].

Процес стрічкового полірування приведено на рисунку 1.9 [19].

Загалом, стрічкове полірування має широкий спектр застосувань у різних галузях, таких як металообробка, виробництво меблів, автомобілів, ювелірних виробів, медичного обладнання тощо.



Рисунок 1.9 - Процес стрічкового полірування

Цей метод дозволяє досягти як естетичного вигляду, так і підвищити корозійну стійкість та зносостійкість матеріалів, що робить його незамінним у сучасному виробництві. Але стрічкове полірування не зовсім підходить для фінішної обробки даних лопаток через нерівномірність зняття матеріалу на комлевих переходах та на складних профілях лопаток. Крім того, цей метод може спричинити перегрів тонкостінних елементів, що негативно впливає на їх геометрію та механічні властивості. Для досягнення необхідної точності та якості поверхні в таких випадках використовуються (або додатково використовуються) інші, більш спеціалізовані методи обробки.

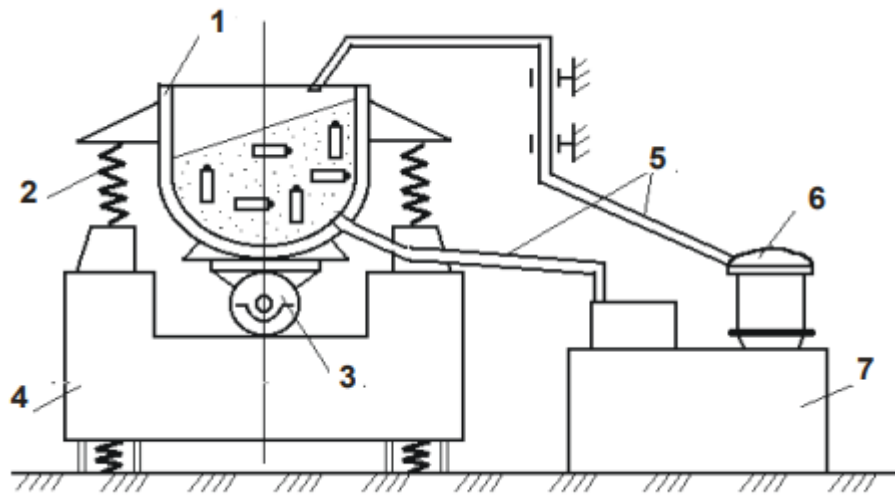
1.3.7 Вібраційна обробка (галтування)

Вібраційна обробка, яку також ще називають галтування або галтовка, залежно від типу робочого середовища, може бути як механічним, так і хіміко-механічним процесом. Вона включає видалення дрібних частинок металу та його окислів з оброблюваної поверхні, а також згладжування мікронерівностей шляхом їх пластичної деформації. Частинки робочого середовища, які виконують коливальний рух під час обробки, сприяють цим процесам. Така обробка дозволяє досягти високої точності та якості поверхні навіть на складних матеріалах [20, с. 44].

Оброблювані деталі завантажують у робочу камеру, яка заповнюється робочим середовищем з необхідними характеристиками. Камера встановлюється на пружній підвісці, що дозволяє їй здійснювати коливальні рухи в різних напрямках. Ці рухи забезпечують ефективне оброблення деталей, оскільки частинки робочого середовища в процесі обробки створюють необхідний механічний чи хіміко-механічний вплив на поверхню. Коливання камери сприяють рівномірному зняттю матеріалу і згладжуванню нерівностей, підвищуючи точність обробки [20, с. 44].

Під час обробки деталі змінюють своє положення в робочому середовищі, що забезпечує рівномірне оброблення всіх поверхонь. Мікроудари, що відбуваються одночасно з різних напрямків, сприяють утриманню деталі в зваженому стані, запобігаючи утворенню грубих вибоїн і інших ушкоджень. Це дозволяє ефективно обробляти деталі з низькою жорсткістю, забезпечуючи високу точність і якість обробки. Завдяки циркуляції робочого середовища обробка відбувається по всіх зонах робочої камери, зокрема найбільш ефективно в її нижній частині, де тиск робочого середовища є вищим [20, с. 44].

Схема процесу вібраційної установки показана на рисунку 1.10 [20, с. 45].



1 - робоча камера; 2 - пружини; 3 - дисбалансний вібратор; 4 - основа;
5 - шланги для подачі та зливу технологічної рідини; 6 - помпа; 7 - бак для
відстоювання

Рисунок 1.10 - Схема процесу вібраційної установки

1.3.7.1 Вібраційна обробка за допомогою обладнання RÖSLER

Масова фінішна обробка RÖSLER пропонує багато рішень для вдосконалення поверхонь незалежно від матеріалу – метал, пластик, кераміка чи дерево. Виконується видалення задирок, полірування, скруглення гострих крайок деталей в різних галузях – авіакосмічна промисловість, медичні технології, автомобільний сектор, монетна справа та ювелірне виробництво. Вібраційна обробка, також відома як масова фінішна обробка або галтування, яка імітує природний процес полірування, шліфувальні матеріали та суміші, які згладжують поверхні, подібно до того, як вода й пісок відшліфовують каміння в руслі річки. Основною перевагою цього методу є його ефективність у порівнянні з іншими техніками. Поєднання кількох етапів обробки в одному процесі дозволяє значно скоротити час роботи, знизити споживання ресурсів і досягти високої економічної вигоди [21].

Вібраційні установки фірми RÖSLER зарекомендували себе як надійне рішення для обробки великих обсягів або важких деталей у процесах масової фінішної обробки. Ці системи підходять для всіх стандартних процесів галтування, включаючи видалення задирок, заокруглення кромки, шліфування, полірування та полірування кульками. Вібраційні ванни можуть використовуватися як для обробки окремих компонентів, так і для одночасної обробки кількох деталей. У разі обробки чутливих деталей їх можна розмістити на спеціальних кріпленнях або розділити перегородками, є можливим захист поверхонь, які не потрібно обробляти.

Принцип роботи всіх моделей вібраторів RÖSLER залишається однаковим. За допомогою вібраційних приводів, адаптованих до розміру та типу системи, полірувальні середовища разом із робочими деталями, що завантажені у робочий простір, приводяться в обертовий вібраційний рух, який формує валоподібну хвилю. Такі системи широко застосовуються в різних галузях, зокрема в авіаційній і автомобільній промисловості, а також у загальному машинобудуванні [22].

Цей метод обробки має такі переваги:

- ідеальне рішення для деталей всіх габаритів;
- заміна майже всіх процесів масової обробки поліруванням;
- можливість індивідуальної або пакетної обробки;
- робочу чашу можна розділити на окремі відсіки;
- ефективна робота завдяки фланцевим приводам;
- економія часу та коштів завдяки автоматичному завантаженню та розвантаженню.

Отже, системи масової фінішної обробки RÖSLER є ідеальним рішенням для обробки лопаток турбін ГТД. Завдяки універсальності, ці установки ефективно виконують різноманітні процеси, такі як видалення задирок, заокруглення кромки та полірування. Їх можливість одночасної обробки великої кількості деталей, включаючи чутливі компоненти, робить їх надзвичайно зручними для обробки наборів (наприклад, комплектів

лопаток на одному лопатовому колесі) складних авіаційних деталей. Ключовими перевагами є швидкість, точність і економічна ефективність. Вібраційні установки RÖSLER дозволяють досягти необхідної якості поверхні, мінімізувати час обробки та забезпечити тривалий термін експлуатації деталей, що є критично важливим. Процес обробки повністю автоматизовано, що виключає використання ручної праці.

1.3.7.2 Вібробразивна обробка за допомогою вібраційних установок U - подібної форми

Ці установки були першими, які з'явилися для заміни ручного полірування [23, с. 14]. Процес роботи таких віброустановок (U-200, U-500, U-1000) для абразивної обробки деталей базується на використанні нерівноважених сил, що виникають завдяки вантажам, закріпленим на кінцях вала вібратора. Вібратор з'єднаний з валом електродвигуна через гнучку зв'язку, що дозволяє електродвигуну обертати вал і викликати коливальний рух вузла контейнера, який розташований на станині віброустановки. Амортизатори, що розташовані між вузлом контейнера та станцією, гасять коливання, що передаються на станину. Вібробразивна обробка може бути як механічною, так і хіміко-механічною [23, с. 14].

Вибір режимів обробки, таких як частота та амплітуда коливань, тип робочих тіл (абразив, сформовані вібротіла, керамічні або металеві кулі, дерев'яні кубики тощо), а також їх маса, залежить від матеріалу лопатки, типу попередньої обробки та вихідної шорсткості поверхні. Це дозволяє досягти бажаного результату для широкого діапазону початкових станів поверхні. Для малих та середніх компресорних лопаток з сталевих і титанових сплавів остаточним етапом є холодне вальцювання та округлення кромки абразивним колом. Для таких лопаток, з шорсткістю Ra 1,6 і ліпше,

використовуються «м'які» режими віброобробки, що вирівнюють мікронерівності [23, с. 21].

Отже, віброабразивна обробка турбінних лопаток сприяє зменшенню трудомісткості, ліквідації ручної праці та покращенню якості їх поверхні.

Проте, ці установки можуть створювати зони нерівномірної обробки на торцевих стінках, мають високі енерговитрати та ускладнюють автоматизацію відділення оброблених деталей в кінці циклу, а також при закінченні операції, треба вручну відбирати лопатки.

1.4 Види наповнювачів

Для сучасних галтувальних установок існує широкий вибір наповнювачів, які відрізняються формою, розмірами та матеріалами виготовлення. Вибір конкретного наповнювача залежить насамперед від матеріалу, що обробляється. Експериментальні дослідження показали, що для фінішної обробки деталей із міцних матеріалів оптимальним рішенням для досягнення гладкої й чистої поверхні є використання керамічних наповнювачів.

Рекомендованими для використання у галтувальних установках фірми RÖSLER є керамічні наповнювачі бренду «Ceramic Media», які забезпечують якісну фінішну обробку поверхонь [24] та показані на рисунках 1.11 та 1.12.

1) Трикутний (D) – універсальний абразивний елемент, що є ефективним і доступним рішенням для багатьох сфер застосування.

2) Коловий трикутний (F) – відрізняється підвищеною механічною стабільністю через збільшені радіуси та меншу чутливість до механічних навантажень.

3) Трикутний з косим зрізом (S) – забезпечує вищу ефективність зняття матеріалу, ніж стандартний трикутник.

4) Трипроменева зірка (DZ) – використовується для обробки зубчастих деталей або складних контурів, забезпечуючи доступ до важкодоступних зон, наприклад, западин між зубцями.

5) Трипроменева зірка з косим зрізом (DZS) – завдяки косому зрізу підвищує ефективність зняття матеріалу та знижує ризик застрягання в порівнянні зі стандартними трипроменевими зірками.

6) Еліпс (E) – ідеальний для згладжування поверхонь.







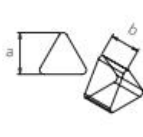
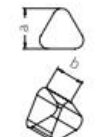
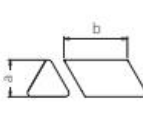
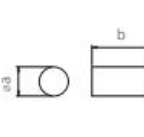
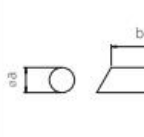

Shape	D Triangle	F Triangle with big radius	S Angle cut Triangle	Z Cylinder	ZS Angle cut cylinder	QZ Quinto
						
Dimensions (mm)	 a/b	 a/b	 a/b	 a/b	 a/b	 a/b

Рисунок 1.11 – Класичні керамічні наповнювачі фірми «Ceramic Media» для фінішної обробки















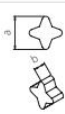





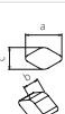



DZ Tristar	DZS Angle cut Tristar	ST Star	E Ellipse	ES Angle cut Ellipse	W Elbow	P Pyramid	K Cone	R Rhombus	PA Paraboloid	G Granulate	MS Multi-Shape (patented)
											
 a/b	 a/b	 a/b	 a/b/c	 a/b/c	 a/b	 a/b	 a	 a/b/c	 a/b	 ∅	 a/b/c

Рисунок 1.12 – Менш розповсюджені керамічні наповнювачі фірми «Ceramic Media»

7) Еліпс з косим зрізом (ES) – удосконалений варіант еліпса, що дозволяє проникати у складні контури заготовок,

8) Гранулят (G) – оптимальний для зачистки, згладжування або очищення заготовок, включаючи внутрішні частини, такі як труби чи отвори.

9) Конус (K) – поєднує ефективне зняття матеріалу із захистом країв заготовки.

10) Піраміда (P) – висока абразивна ефективність досягається за рахунок ребер, що сходяться у вершинах.

11) Циліндр з двома косими зрізами (QZ) – характеризується високою рухливістю та здатністю проникати в дрібні прорізи й отвори завдяки клиновидній формі.

12) Кути (W) – схожі на трипроменеві зірки за принципом роботи, але більш ефективні та стійкі при знятті великих обсягів матеріалу.

13) Циліндр (Z) – ідеально підходить для видалення внутрішніх задирок із труб і отворів.

14) Циліндр з косим зрізом (ZS) – легко проходить через складні зони, прорізи та отвори, забезпечуючи якісну обробку навіть у важкодоступних місцях.

В разі використання вільного абразиву треба враховувати наявність в турбінних лопатках перфораційних охолоджувальних отворів, тому вибір зернистості абразиву має значення: він має бути або значно менший, щоб потім легко вимивався з отворів, або, як у випадку наповнювачів бренду «Ceramic Media» - абразивні зерна є складовою гранул, розмір яких значно перевищує діаметр отворів. Є можливість використовувати суміш різних наповнювачів (рис. 1.13).

Враховуючи розміри і геометрію авіаційних лопаток, а також властивості різних форм керамічних абразивних наповнювачів, після попередніх досліджень, встановлено, що найкращий результат досягали за допомогою керамічного абразивного наповнювача серії RCP ZS (рисунок 1.11), тому в наступних досліджах і експериментах будуть використовуватися саме вони.



Рисунок 1.13 – Суміш керамічних наповнювачів та сортувальна решітка

У камеру завантаження віброустановки засипають наповнювач (абразивні тіла), подають робочу рідину, компаунд і налаштовують режими обробки, а саме обирають частоту механічних коливань в межах 20...50 Гц і амплітуду коливань від 1 до 10 мм.

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

2.1 Зразки для проведення експериментів

Надійність газотурбінних двигунів багато в чому визначається надійністю роботи лопаток компресора та турбіни, оскільки ці деталі зазнають найбільших навантажень. Вони розташовані в потоці газу, змінюють його параметри та відіграють ключову роль у роботі двигуна. Одним із важливих факторів, що впливають на їх надійність, відсутність помпажу, падіння потужності через це, є шорсткість поверхні лопаток, яка визначає аеродинамічні характеристики і ступінь їх зношування [3], [25].

В якості зразків для проведення експериментів були взяті наступні партії натурних лопаток (серійні, але деякі з них з надрізом, що означає несуттєвий для даних досліджень брак серійної лопатки): лопатки соплові 1, лопатки робочі 1 ст (ступеню), лопатки робочі 2 ст., лопатки робочі ТВТ (турбіни високого тиску), лопатки соплові 2. Зовнішній вигляд лопаток, на яких проводилися експерименти вказані на рис. 2.1-2.3. Натурні лопатки були взяті для експериментів через збереження всіх факторів впливу операції формоутворення лопаток, тобто технологічної спадковості.



Рисунок 2.1 – Лопатка робоча ст. 1 та ст. 2



Рисунок 2.2 - Лопатка рабоча ТВТ



Рисунок 2. 3 - Лопатка соплова 1

Досліджувані турбінні лопатки виготовлено з жароміцних сплавів на основі нікелю ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ і на основі титану ВТ-3 та ВТ-8.

Хімічний склад матеріалів наведено в таблиці 2.1, 2.2, 2.3, 2.4; доля хімічних елементів вказана у відсотках (%).

Таблиця 2.1 – Хімічний склад, %, матеріалу ЖС26-ВІ [26]

Fe	Si	Co	Cr	Ti	Ni	V
< 1	< 0,3	8-10	4,3-5,6	0.9-1.3	60-68,3	1
Al	Ce	C	Nb	La	Y	Mo
5,6-6,3	0,025	0,15	1,2-1,6	0,005	0,005	0,8-1,4

Таблиця 2.2 – Хімічний склад, %, матеріалу ЖС32-ВІ [27]

Fe	Si	B	Bi	Co	Cr	Zr
< 1	< 0,4	< 0,0005	< 0,0005	8-10	4,3-5,6	< 0,06
Al	Pb	Ce	Ni	S	Y	Mo
5,6-6,3	< 0,0012	< 0,025	54,5633- 65,08	< 0,01	0,01	0,8-1,4

Таблиця 2.3 – Хімічний склад, %, матеріалу ВТ-3 [28]

Fe	C	Si	Cr	Mo	N	Zr
0,2-0,7	< 0,1	0,15-0,4	0,8-2	2-3	< 0,05	< 0,6
Al	O	H	Ti			
5,5-7	< 0,15	< 0,015	85,95- 91,05			

Таблиця 2.4 – Хімічний склад, %, матеріалу ВТ-8 [29]

Fe	C	Si	Ti	Mo	N	Zr
0,3	< 0,1	0,2-0,4	87,55- 90,9	2,8-3,8	< 0,05	< 0,5
Al	O	H				
5,8-7	< 0,15	< 0,015				

Головним критерієм оцінки було забезпечення рівня шорсткості зовнішніх поверхонь по покриттям, по радіусах вхідної та вихідної кромки Ra 0,8 мкм, а по спинці корита, проточній поверхні полиці радіусів переходу до пера Ra 1,6 мкм. Перевіряли також точність лопаток по перетинам згідно карті контролю.

2.2 Методика ручного полірування

Фінішна обробка кожної окремої лопатки виконувалася вручну на полірувальному верстаті мод. 3853 з захисним кожухом (рис. 2.4), оснащеному двома полірувальними дисками (базова технологія). Попередні дослідження зразків і лопаток дозволили визначитись з раціональним використанням інструменту, оснащення та обладнання з точки зору продуктивності та якості обробки відповідальних поверхонь (кромки) і важкодоступних місць (наприклад, комлевого переходу). Ці режими прописані в базовій технології. Як інструмент для ручного полірування лопаток турбіни послідовно використовувалися абразивні круги ПП 80×10×32 25А 12СМ1 F120 і ПП 100×20×20 25А 12СМ1 F180.



Рисунок 2.4 – Полірувальний верстат мод. 3853

При такій обробці є складність в нормуванні операції. Тривалість обробки в значній мірі залежить від залишеного для цієї операції припуску та кваліфікації слюсаря-полірувальника. Тому час ручного полірування дрібних лопаток складав приблизно 0,5...0,6 години, середньогабаритних лопаток – 0,8...1 годину.

2.3 Устаткування для автоматичного вібраційно-абразивного галтування

Дослідницькі роботи проводилися на установках RÖSLER R420 EC (рис. 2.5, 2.6), RÖSLER R600/2000 TSD (рис. 2.7, 2.8) , RÖSLER FSK 06.1 E (рис. 2.9, 2.10) .

Кругові віброустановки з однорівневим дном підходять для обробки великих, громіздких або чутливих до пошкоджень лопаток. У процесі обробки лопаток, вони рівномірно оточуються абразивними елементами в

робочій ємності. Якщо необхідно уникнути контакту між окремими лопатками, їх розміщують у секціях, утворених перегородками, що створюють структуру у вигляді «гребного колеса». Вивантаження заготовок виконується після обробки оператором: додатково може бути встановлена нижня заслінка, яка дозволяє повністю вивантажувати установку, після чого деталі та абразивні частинки розділяються зовні – вручну або за допомогою спеціального сепараційного обладнання RÖSLER [30], яке значно скорочує допоміжний час операції.



Рисунок 2.5 – Кругова установка фірми RÖSLER R420 EC в робочому герметично закритому стані

Галтувальні установки для великогабаритних деталей RÖSLER R600/2000 TSD – це обладнання для серійної і масової обробки, яке підходить для широкого спектра завдань. Вони переважно використовуються для обробки делікатних, важких, довгих або громіздких деталей.



Рисунок 2.6 – Кругова установка фірми RÖSLER R420 EC в процесі завантаження

Завдяки потужності машин RÖSLER R600/2000 TSD, за допомогою них можна обробляти деталі довжиною до 6000 мм або з діагональним поперечним перерізом до 1000 мм [31], що для авіаційної промисловості, в якій розміри деталей часто можуть перевищувати ліміти звичайного обладнання (лопатки вентилятора).

Галтувальні ванни (рис. 2.7, 2.8) підходять для виконання різноманітних завдань масової фінішної обробки, таких як видалення задирок, шліфування поверхонь, заокруглення країв, полірування, зняття задирок під тиском та обробка кулькових деталей. Вони ефективно використовуються для фінішної обробки штампованих, литих, кованих або механічно оброблених компонентів. Зазвичай ці машини застосовуються для обробки окремих великогабаритних деталей, але також можуть виконувати обробку кількох заготовок одночасно. Це досягається завдяки використанню ванн із вбудованими розділювачами або шляхом закріплення заготовок на спеціальних швидкозйомних тримачах [31].



Рисунок 2.7 – Установка фирмы RÖSLER R600/2000 TSD



Рисунок 2.8 – Установка фирмы RÖSLER R600/2000 TSD з завантаженим
наповнювачем

Високоенергетичні дискові системи RÖSLER FSK 06.1 E (рис. 2.9, 2.10) є високоефективними, компактними та зручними у використанні рішеннями для обробки поверхонь деталей різних форм, розмірів і кількостей. У порівнянні з традиційними вібраційними системами, ця технологія забезпечує продуктивність, яка перевищує їх у 10-15 разів. Широкий вибір обладнання дозволяє точно адаптувати наші технічні рішення до ваших індивідуальних потреб обробки. Завдяки наявності численних периферійних модулів для завантаження та подальшої обробки, високоенергетичні дискові системи можна інтегрувати у повністю автоматизовані виробничі лінії [22].



Рисунок 2.9 – Кругова установка фірми RÖSLER FSK 06.1 E

Високоенергетичні дискові системи складаються з круглої стаціонарної обробної чаші та обертового ротора, розташованого на її дні. Відцентрова сила, що створюється обертанням ротора, змушує суміш абразивного середовища та деталей переміщуватися вздовж стінок чаші. Після зменшення

швидкості та впливу гравітації суміш повертається до ротора, де знову прискорюється. Регулювання швидкості обертання ротора та кількості технологічної рідини в чаші дозволяє використовувати цю систему для широкого спектра завдань – від інтенсивного видалення задирок і шліфування до досягнення дзеркального полірування [22].



Рисунок 2.10 – Панель керування кругової установки фірми
RÖSLER FSK 06.1 E

Режим 1. Обробка послідовно:

- обробка із застосуванням керамічного абразиву RCP ZS 09/09, рідкий компаунд ZF 113, розведений водою 13%, абразивна паста RSP508 1,7 кг, подача води в установку вимкн., час обробки 6 год, загальний час обробки 7 год, обробка деталей проводилася на частоті механічних коливань 49,5 Гц, амплітуда 3...4 мм, кількість обертів установки 1500 об/хв;

- обробка із застосуванням керамічного абразиву RP ZS 04/05, рідкий компаунд ZF 113, розведений водою 13%, абразивна паста RSP508 1,7 кг,

подача води в установку вимкн., час обробки 1 год, загальний час обробки 7 год, обробка деталей проводилася на частоті механічних коливань 49,5 Гц, амплітуда 3...4 мм, кількість обертів установки 1500 об/хв.

Режим 2.

- Обробка виконувалась із застосуванням керамічного абразиву RSG ZS 04/05, рідкий компаунд FC 120, розведений водою 13%, абразивна паста RSP508 1,7 кг, подачу води в установку увімкнено, витрата води 50 л/год, подача компаунда 25% на 40% догляду, загальний час обробки 7 год, обробка деталей проводилася на частоті механічних коливань 49,5 Гц, амплітуда 3...4 мм, кількість оборотів установки 1500 об/хв.

За допомогою попередніх досліджень було встановлено, що режим 1 з обробкою послідовно керамічного абразиву RP ZS 09/09 6 годин та RP ZS 04/05 1 година та рідким компаундом ZF 113 показала кращу якість обробки. Тобто загалом набір лопаток (кількість яких складала 36...115 штук) оброблювався 7 годин.

2.4 Методика визначення шорсткості

Вимірювання шорсткості поверхні оброблених лопаток проводили за допомогою приладу PCE Instruments PCE-RT 2200, який показаний на рисунку 2.11 [32]. Профілометр оснащений чіпом DSP, що забезпечує швидку обробку даних з низьким споживанням енергії. Прилад має широкий діапазон вимірюваних параметрів, таких як Ra , Rz , Rq та інші. Великий РК-дисплей надає всю необхідну інформацію про вимірювання, включаючи параметри та графіки. Завдяки вбудованій пам'яті можна зберігати до 100 груп даних, які потім можна передавати на ПК через USB-інтерфейс.



Рисунок 2.11 - PCE-RT 2200 професійний профілометр

2.5 Методика визначення товщини покриття

Вимірювання товщини покриття оброблених деталей проводили за допомогою приладу Leica M205 (рисунок 2.12) [33].



Рисунок 2.12 - Leica M205 - дослідницький стереомікроскоп

Leica M205 - дослідницький стереомікроскоп з трансфокатором 20,5:1. Стереомікроскоп Leica M205 оснащений трансфокатором 20,5:1 і використовує новітню технологію FusionOptics™. Базовий діапазон збільшення становить 7,8-160[×]. Максимальне збільшення досягає 1280[×], можливе оснащення револьверним пристроєм для встановлення двох об'єктивів [33].

Контрольні виміри розмірів лопаток по перетинах виконували на спеціальному пристосуванні за контрольною картою базової технології.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЛОПАТОК В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВИДУ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ

3.1 Ручне полірування лопаток

Під ручне полірування залишається припуск в залежності від габаритів і матеріалу лопаток 0,1...0,2 мм.

На рисунку 3.1 показано процес ручного полірування на полірувальному верстаті з двома встановленими полірувальними кругами, які підбирають, враховуючи радіус заокруглення корита пера лопатки.

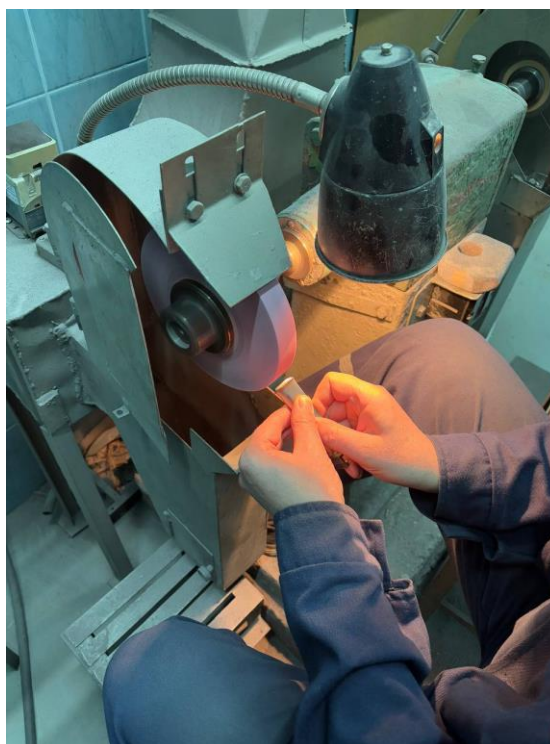


Рисунок 3.1 – Полірування лопаток вручну на полірувальному верстаті 3853

Візуальний контроль оброблених поверхонь показав, що після ручного полірування спостерігалися мікрodefекти у вигляді рисок (рис. 3.2), які можуть призводити до утворення втомних мікротріщин. Шорсткість лопаток в залежності від виду лопаток та режимів полірування складала 0,2...0,6 мкм.

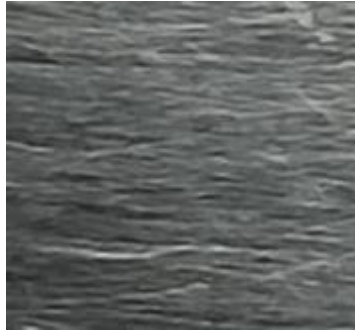


Рисунок 3.2 – Риски, що залишились на поверхні спинки лопатки після ручного полірування ($\times 25$)

Тривалість полірування кожної лопатки складала 0,5...1 години. Враховуючі, що набір лопаток в залежності від ступеню турбіни та двигуна складає 36-115 штук, загальний час обробки набору складає 36...58 годин.

Заміри точності лопаток, оброблених за перетинами, що всі оброблені лопатки відповідають вимогам відповідних креслень по точності.

3.2 Галтування лопаток

Техніка галтування лопаток наступна: наповнювач (абразивні тіла) та оброблювані деталі завантажуються в камеру вібраційної установки, і за допомогою генератора вібрацій приводяться в рух відносно одні одного, поступово проводиться дозована подача робочої рідини води та компаунду.

Для покращення шорсткості поверхні лопаток з жаростійкими покриттями були проведені роботи на віброгалтувальному обладнанні фірми RÖSLER (Німеччина). Наявний парк обладнання дозволяє провести експерименти на всій лінійці обладнання, що випускається фірмою, і випробувати величезну кількість абразивних тіл Ceramic Media.

Фірма RÖSLER має великий досвід в обробці різних лопаток та інших деталей ГТД.

Варіанти обробки представлені в таблиці 3.1. Обробляється одразу весь набір лопаток.

Заміри точності за перетинами показали, що всі оброблені лопатки відповідають вимогам відповідних креслень по точності.

Таблиця 3.1 – Варіанти обробки лопаток фірми RÖSLER (мкм)

№ досл.	Параметри обробки				
	Установка	Стан	Наповнювачі	Паста	Компаунд
1	R420 EC	Вільний	RCP ZS 09/09 RCP ZS 04/05	RSP 508 S	FC 113
2	R600/2000 TSD	Закріпленні (спинка вгору)	RCP ZS 09/09 RCP ZS 04/05	RSP 508 S	ZF 113
3	FSK 06.1E	Вільний	RCP ZS 09/09 RCP ZS 04/05	-	FC 113
4	Лопатки без обробки (вихідні)				

При дослідженні установок RÖSLER R420 EC, RÖSLER R600/2000 TSD, RÖSLER FSK 06.1 E було обрано RÖSLER R420 EC, тому що не витрачали час на закріплення та відкріплення лопаток, їх габарити дозволяють обробляти їх незакріпленими, «насіпом»; і якість лопаток, оброблених на ній, була вищою на 12...15% ніж на RÖSLER FSK 06.1E за рахунок використання абразивної пасти.

Після віброабразивної обробки мікродфектів на обробленій поверхні не виявлено, поверхня мала розвинений мікрорельєф.

Шорсткість поверхонь лопаток з жароміцними покриттями до і після обробки представлена в таблиці 3.2 і в таблиці 3.3. Замір товщини покриття після галтування в чотирьох зонах, представлених на рисунку 3.3, приведено в таблиці 3.4

Таблиця 3.2 – Шорсткість лопаток с серійним покриттям

Партія лопаток	Шорсткість Ra, мкм			Покриття
	Спинка	Корито	Проточна полка	
Лопатки соплові 1	1,13	0,87	-	ВСПД-11
Лопатки робочі 1 ст.	2,01	1,57	1,5	
Лопатки робочі 2 ст.	2,42	2,1	1,16	
Лопатки робочі ТВТ	2,38	2,3	2,22	СДП-2
Лопатки соплові 2	2,49	2,39	3,63	

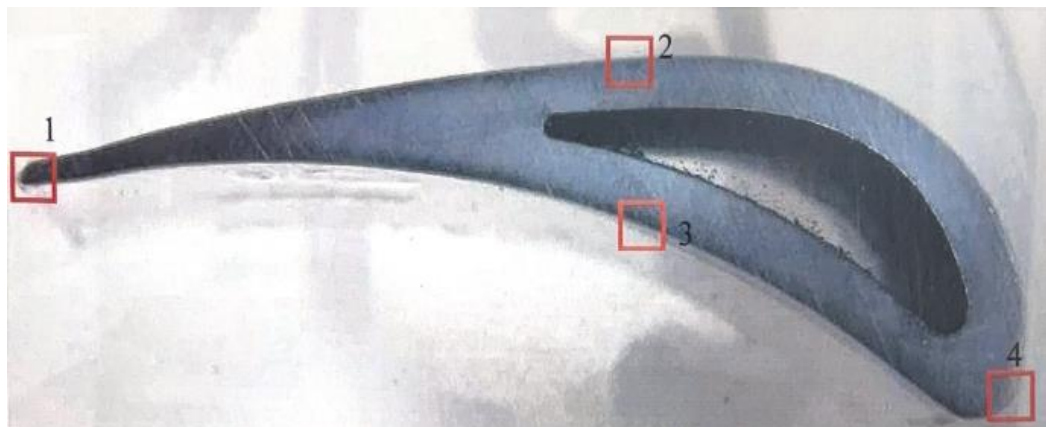


Рисунок 3.3 – Місця (зони) вимірювання товщини серійного покриття

Деякий результат галтування можна оцінити вже за зовнішнім виглядом – звертаючи увагу на стан поверхні. Галтування проводилося за допомогою сучасного обладнання фірми RÖSLER, а саме моделі R420 EC. Результат за зовнішнім виглядом і зображено на рисунках 3.4, 3.6, 3.8, 3.10, 3.12. А вимірювання мікрошліфів покриття зображено на рисунках 3.5, 3.7,

3.9, 3.11, 3.13. Результати замірів шорсткості показані на рисунках 3.13...3.16 та вимірювання товщини показано на рисунку 3.17.

Таблиця 3.3 – Шорсткість лопаток с покриттям після обробки RÖSLER

Партія лопаток	Шорсткість Ra, мкм			Покриття
	Спинка	Корито	Проточна полка	
Лопатки соплові 1	0,85	1,28	-	ВСПД-11
	0,093	0,094	-	
	0,47	0,56	-	
Лопатки робочі 1 ст.	0,23	0,57	1,15	
	0,32	0,34	0,99	
	1,07	0,63	0,5	
Лопатки робочі 2 ст.	0,18	0,34	0,91	
	0,1	0,97	1,39	
	1,14	0,73	0,9	
Лопатки робочі ТВТ	0,1	0,85	0,8	СДП-2
	0,5	0,42	0,73	
Лопатки соплові 2	0,97	0,7	1,54	
	0,48	0,9	0,3	



Рисунок 3.4 - Лопатки соплові 1, покриття СДП-2

Таблиця 3.4 – Результати вимірювання товщин покриття (мм); зони
рис. 3.3

Партія лопаток	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Товщина покриття по ТВ креслення
Лопатки соплові 1	0,073	0,069	0,05	0,03	0,03...0,08
Лопатки робочі 1 ст.	0,03	0,03...0,04	0,062	0,04	0,03...0,08
Лопатки робочі 2 ст.	0,05...0,065	0,06	0,065	0,04	0,03...0,08
Лопатки робочі ТВТ	0,04...0,049	0,04...0,05	0,043	0,06	0,03...0,08
Лопатки соплові 2	0,044	0,06	0,045	0,07	0,03...0,08

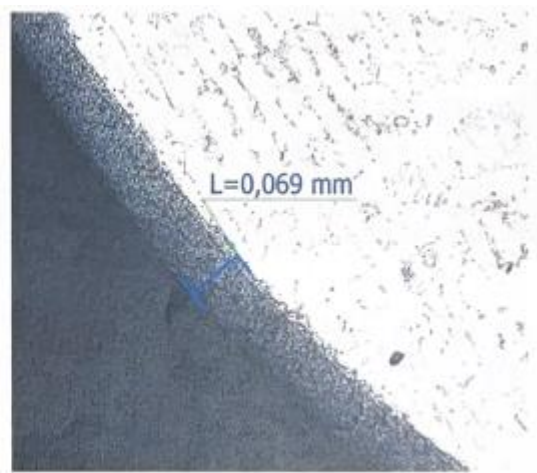
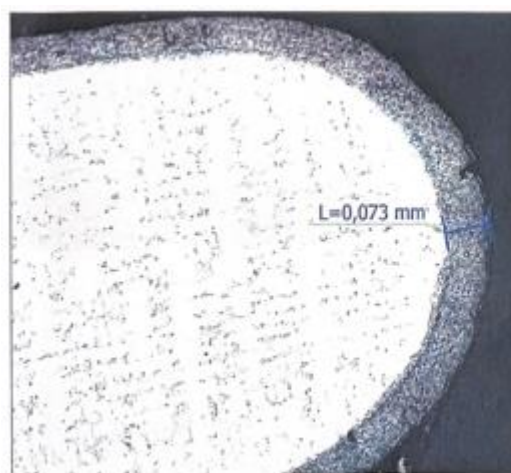


Рисунок 3.5 - Мікрошліфи покриття після галтування, лопатка соплова 1



Рисунок 3.6 - Лопатки робочі 1 ст., покриття СДП-2

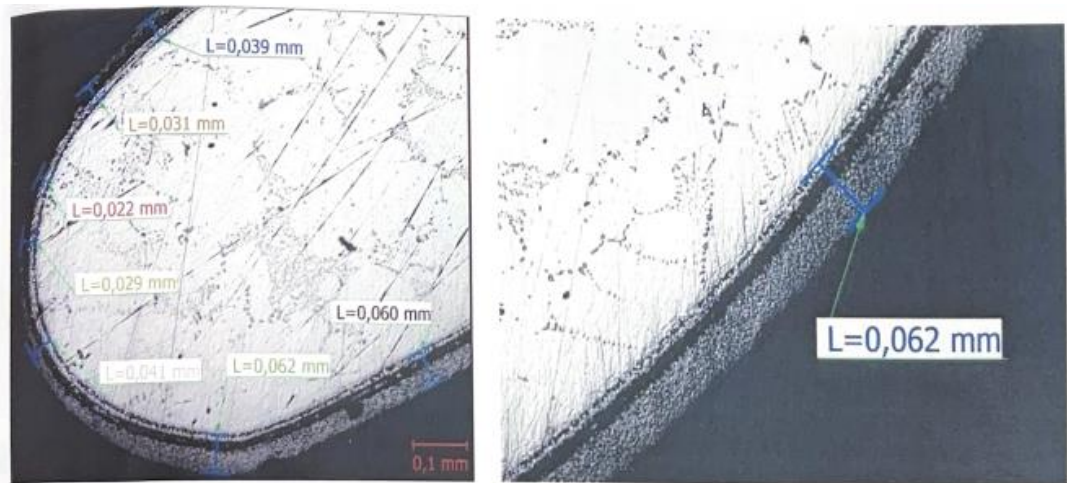


Рисунок 3.7 - Мікрошліфи покриття після галтування, лопатки робочі 1 ст.



Рисунок 3.8 - Лопатки робочі 2 ст., покриття СДП-2

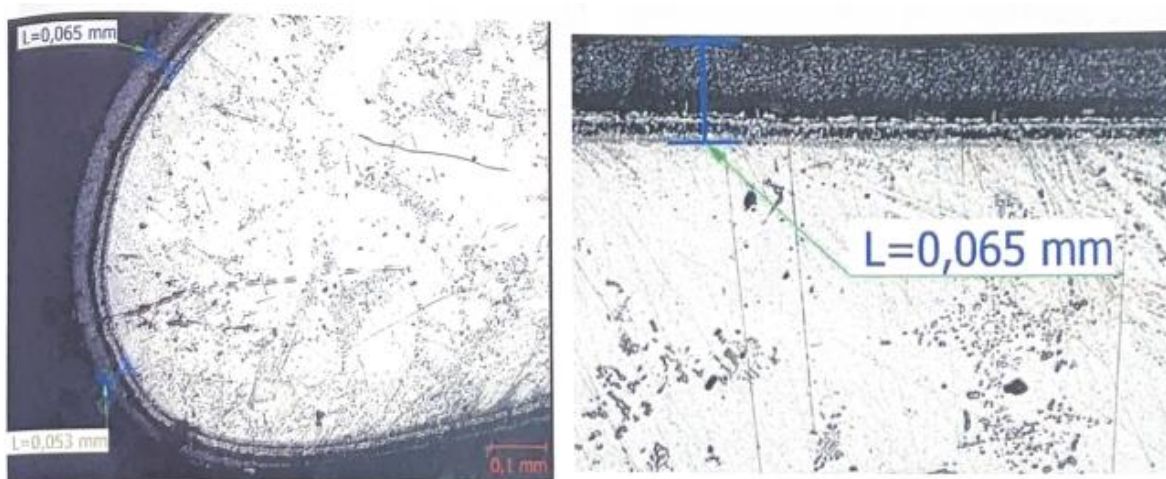


Рисунок 3.9 - Мікрошліфи покриття після галтування, лопатка робоча 2 ст.

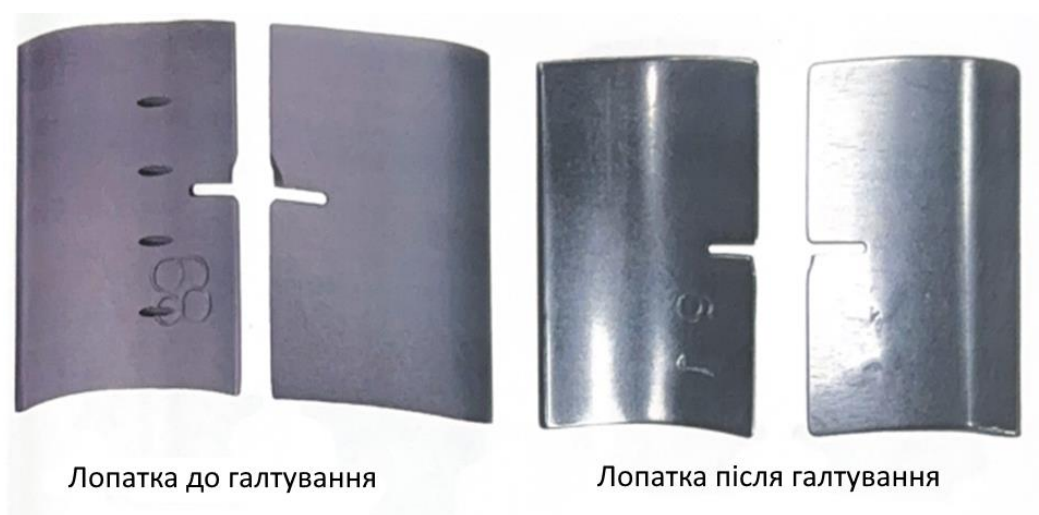


Рисунок 3.10 - Лопатки соплові, покриття ВСДП-11

З цього дослідження ми можемо побачити, що після обробки на установці RÖSLER R420 EC, всі досліджені лопатки мали кращу шорсткість (таблиці 3.2 та 3.4, рисунок 3.14...3.16), блискучу поверхню, рівномірну обробку.

Щодо покриття, то аналіз мікрошліфів показав, що лопатки не мають схильності на погіршення покриття, мікроструктура під покриттям не змінюється, покриття мають стабільну однакову товщину в межах оговореної в технічних вимогах креслень (табл. 3.4, рис.3.17). Відшарування покриття не спостерігалось.

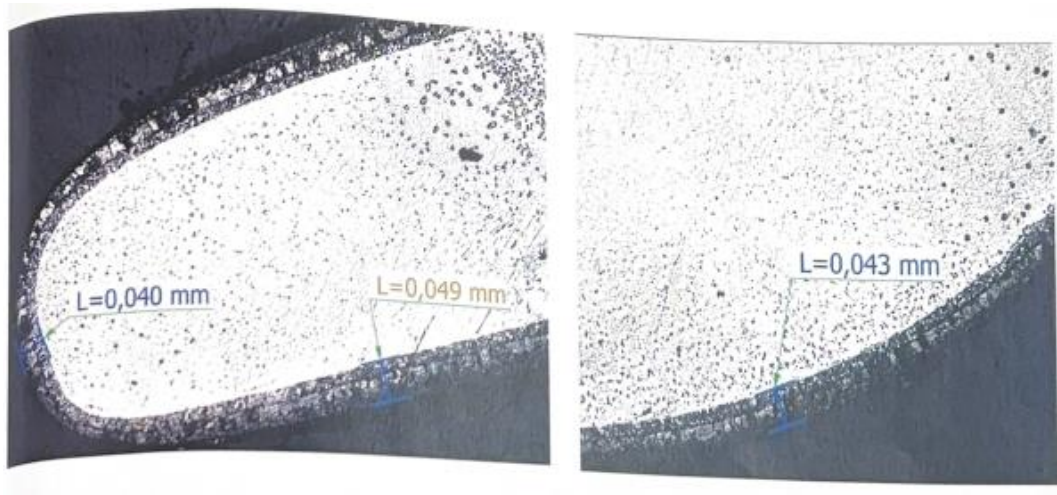


Рисунок 3.11 - Мікрошліфи покриття після галтування, лопатки соплові 2



Рисунок 3.12 - Лопатки робочі ТВТ, покриття ВСДП-11

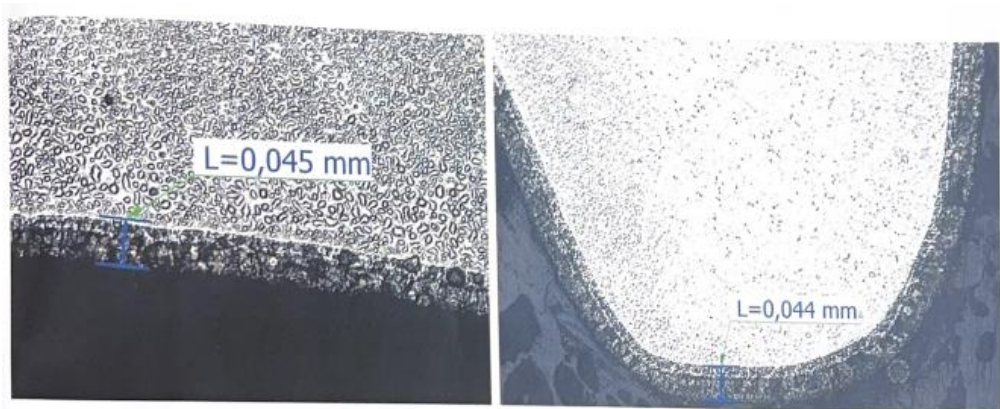


Рисунок 3.13 - Мікрошліфи покриття після галтування, лопатки робочі ТВТ

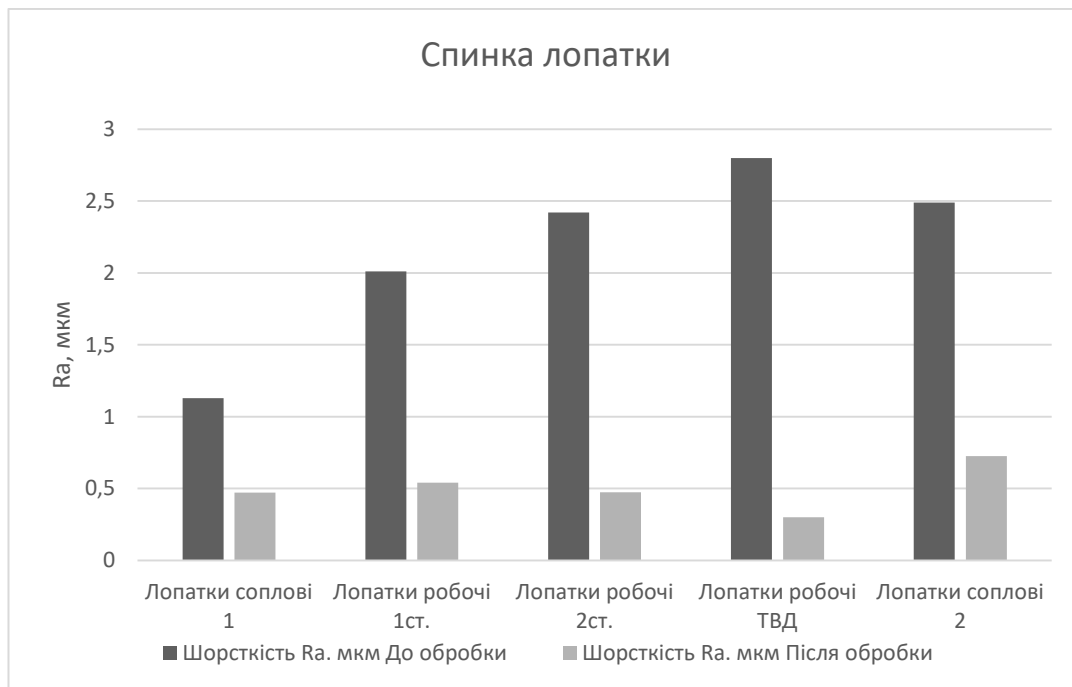


Рисунок 3.14 – Результати заміру шорсткості лопаток, оброблених галтуванням, по спинці

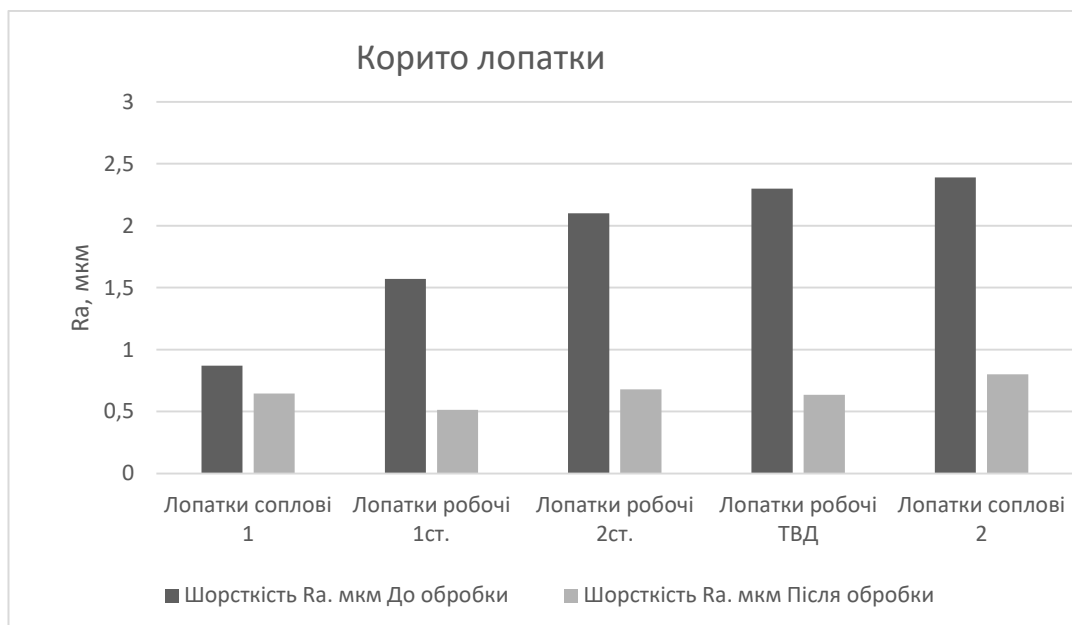


Рисунок 3.15 – Результати заміру шорсткості лопаток, оброблених галтуванням, по кориту

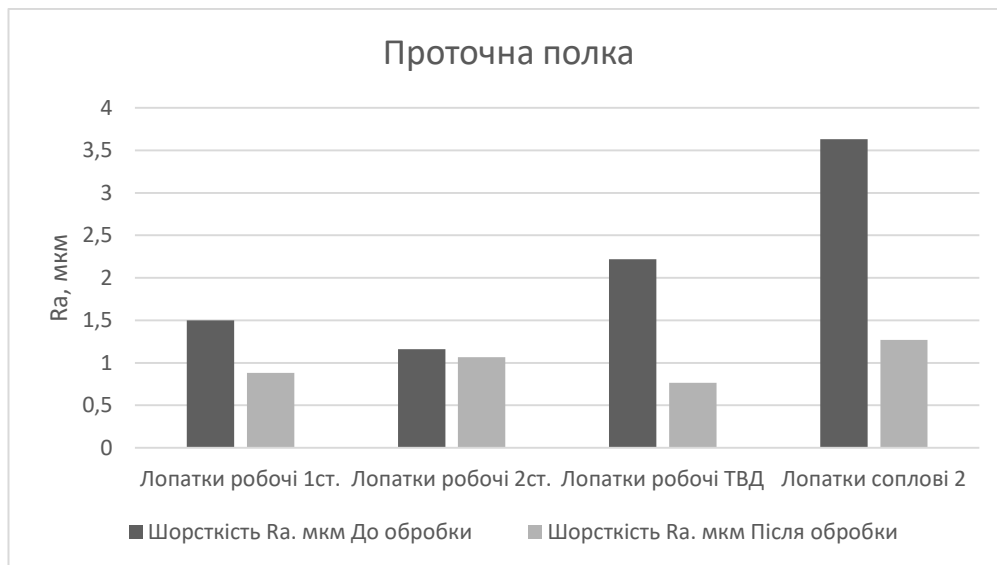


Рисунок 3.16 – Результати заміру шорсткості лопаток, оброблених галтуванням, по проточній полці

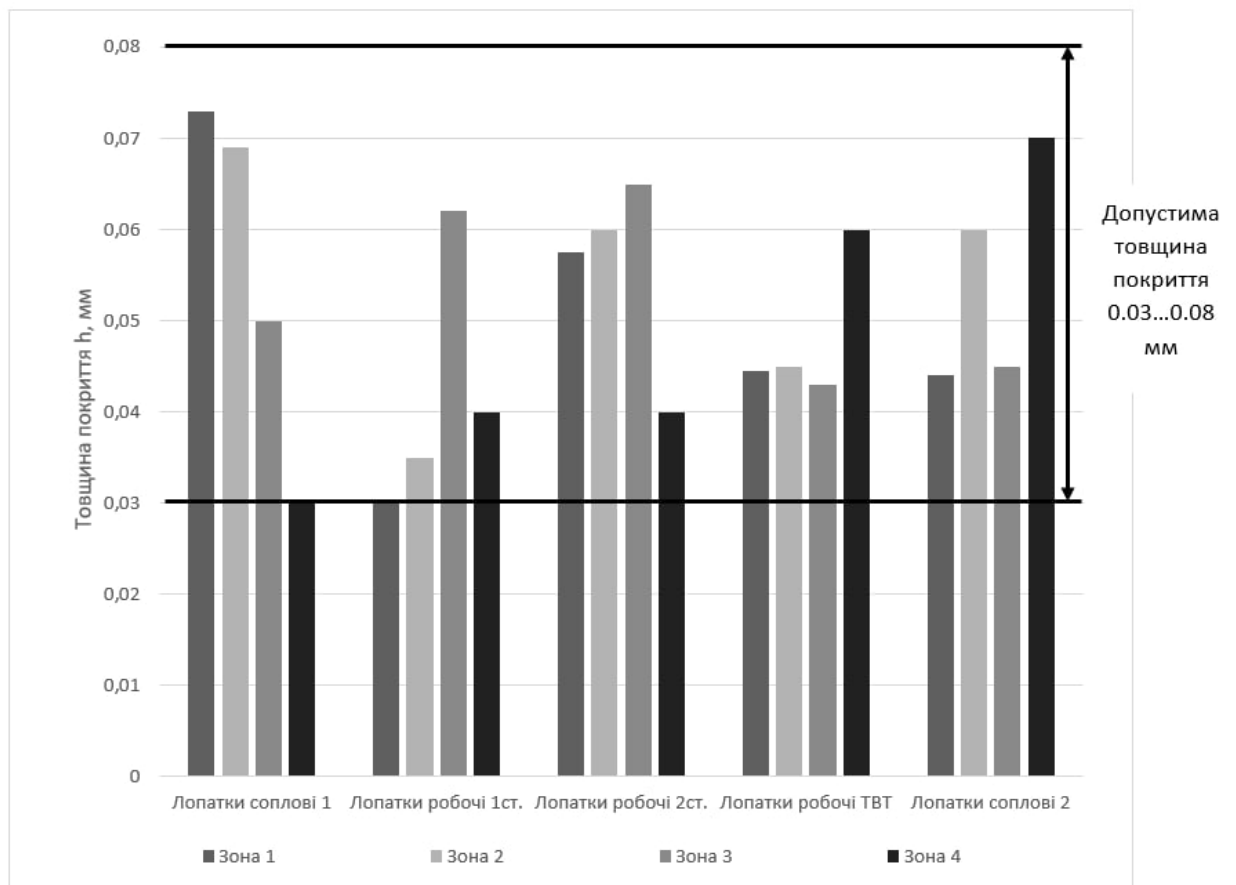


Рисунок 3.17 – Результати вимірів товщини покриття лопаток турбін після оброблення галтуванням (зони – рис. 3.3)

Проведене дослідження показало наступне:

1) точність усіх досліджених типів лопаток (соплових, робочих та лопаток ТВТ), виміряна по технології контролю базового виробництва після ручного полірування і віброабразивного галтування – в межах вимог креслень;

2) шорсткість лопаток після ручного полірування 0,2...0,6 мкм, після галтування пера 0,1...1,28 при умові креслень 0,8...1,6 мкм;

3) аналіз мікрошліфів після галтування показав, що лопатки не мають схильності щодо погіршення покриття, вони мають стабільну однакову товщину в межах оговореної в технічних вимогах креслень, мікроструктура під покриттям не змінюється; відшарування покриття не спостерігалось;

4) ручне полірування набору лопаток (в одному наборі від 36 до 115 штук) займає в середньому 36...58 годин, тривалість віброгалтовки одного набору 7 годин. Тобто порівняно з ручним поліруванням продуктивність підвищилась в 5...8 разів;

5) віброабразивне галтування дозволяє відмовитись від ручної праці на фінішному етапі виготовлення лопаток турбіни ГТД.

Проведені роботи на робочих та соплових лопатках із жаростійкими покриттями з віброабразивним галтуванням на обладнанні фірми RÖSLER C застосуванням їх витратних матеріалів показали:

а) істотне поліпшення шорсткості поверхні спинки, корита та проточних полок;

б) мінімальне та рівномірне знімання нанесеного покриття з можливістю його контролю за часом;

в) можливість механізувати полірування лопаток;

г) продуктивність можна регулювати типом обладнання та застосуванням технологічних засобів;

г) можливість регулювати інтенсивність обробки з боку спинки, корита, вхідної або вихідної кромки шляхом закріплення лопаток в галтувальному барабані; також можна закріплювати великі лопатки;

д) об'єми барабанів дозволяють обробляти лопатки наборами (моторокомплектами), що забезпечує стабільну якість;

е) є можливість застосування захисної оснастки для поверхонь, що не підлягають галтуванню.

4 ОЦІНКА ОЧІКУВАНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ

Перед нанесенням жаростійких покриттів на зовнішні поверхні робочих лопаток турбін фінішна обробка для досягнення необхідного класу шорсткості виконується ручним поліруванням, що є трудомістким процесом. Шорсткість поверхонь після фінішної обробки повинна бути: на радіусах вхідних/вихідних кромek Ra 0.8, за профілем пера та радіусами переходів Ra 1.6.

Також для збільшення газодинамічних характеристик роботи робочих лопаток турбін потрібно зниження шорсткості поверхонь після покриття до величини порядку Ra 1.6, що може бути досягнуто додатковою обробкою. В даний момент досягається шорсткість зовнішніх поверхонь робочих лопаток після нанесення жаростійких покриттів становить Ra 2.5... Ra 3.5.

Галтувальна кругова віброустановка RÖSLER R420 EC потрібна для виконання віброабразивної обробки до покриття з метою заміни ручних полірувальних робіт і після покриття з метою зменшення шорсткості зовнішніх поверхонь.

Річна програма включає обробку 800 лопаток з використанням галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC, в той час, як раніше використовувались абразивні круги – шліфувальні круги з електрокорундом нормальним 25А на керамічній зв'язці.

Розрахуємо витрати на інструменти до впровадження галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC та після її використання в таблиці 4.1.

Вартість інструменту на рік (B_p), тобто для виконання річної програми, розрахуємо за допомогою формули (4.1) [34, с. 23]:

$$B_p = B_0 \cdot K_p \quad (4.1)$$

де B_0 – вартість одного інструменту, грн.;

K_p – річна кількість інструментів, потрібних для обробки деталей, од.

Таблиця 4.1 – Порівняння витрат на інструменти до та після впровадження галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC

Показник	З використанням галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC	До використання галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC
Інструмент	галтувальна кругова віброустановка RÖSLER R420 EC	абразивні круги – шліфувальні круги з електрокорундом нормальним 25А на керамічній зв'язці
Кількість інструменту на рік	1	180
Вартість інструменту, тис. грн.	140	0,25
Витрати на інструмент на рік, тис. грн.	140	45

Розрахунки показують, що впровадження галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC вимагає вищих фінансових витрат порівняно з використанням шліфувальних кругів з електрокорундом нормальним 14А на магнезійній зв'язці. Різниця становить 95 тис. грн.

Розрахуємо витрати на електроенергію до впровадження галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC та після її використання в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняння витрат на електроенергію до та після впровадження галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC

Показник	З використанням галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC	До використання галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC
Вартість кВт, грн.	7,5	7,5
Потужність обладнання, кВт/год	4	2,5
Кількість використаних кВт за зміну (8 год.)	24	12
Кількість робочих днів на рік	262	262
Вартість використаних кВт за рік, тис. грн.	6288	3144
Кількість використаних кВт за рік	47,16	23,58

Наведені дані показують, що витрати на електроенергію при використанні галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC становитимуть 47,16 тис. грн., що на 23,58 тис. грн. більше, ніж до впровадження цього обладнання.

У таблиці 4.3 буде розраховано витрати на оплату праці та соціальні відрахування до та після впровадження галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC.

Витрати на оплату праці (*ВП*) розраховуємо за допомогою формули (4.3) [35, с. 50]:

$$ВП = C_o \cdot K_{пр} \quad (4.3)$$

де C_o – середньомісячний оклад, грн.;

$K_{пр}$ – кількість працівників, задіяні у виробничий процес.

Витрати на відрахування до єдиного соціального внеску ($V_{есв}$) розраховуємо за допомогою формули (4.4) [35, с. 50]:

$$V_{есв} = ВПр \cdot 22\% \quad (4.4)$$

де $ВПр$ – річні витрати на оплату праці, тис.грн.

Таблиця 4.3 – Оцінка витрат на оплату праці та соціальні відрахування до введення в експлуатацію галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC та після її впровадження

Показник	З використанням галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC	До використання галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC
1	2	3
Кількість працівників	1	6
Середньомісячний оклад 1 працівника, грн.	18000	16000
Річний фонд заробітної плати всіх працівників, тис. грн.	216	1152

Продовження таблиці 4.3

1	2	3
Відрахування на обов'язкове соціальне страхування за рік (ЄСВ 22%), тис. грн.	47,52	253,44
Разом річний фонд оплати праці та річні соціальні відрахування, тис. грн.	263,52	1405,44

Наведені дані показують, що річний фонд оплати праці та річні соціальні відрахування до впровадження галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC становили 1405,44 тис. грн., а після впровадження – 263,52 тис. грн., що на 1141,92 тис. грн. менше.

Завдяки використанню цієї установки вдалося знизити кількість працівників з 6 до 1, що призвело до значного зменшення витрат на оплату праці та соціальні відрахування.

Для визначення економічного ефекту від впровадження галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC всі витрати будуть згруповані в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Оцінка економічного ефекту від запровадження галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC

Показник	З використанням галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC	До використання галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC
Річна програма, кількість лопаток	800	800
Витрати на інструмент на рік, тис. грн.	140	45
Вартість використаних кВт за рік, тис. грн.	47,16	23,58
Разом річний фонд оплати праці та річні соціальні відрахування, тис. грн.	263,52	1405,44
Амортизаційні відрахування (20% від фонду оплати праці)	43,2	230,4
Разом витрати, тис. грн.	493,88	1704,42
Витрати на 1 лопатку, грн.	617,35	2130,53

Дані, наведені в таблиці 4.4, підтверджують доцільність впровадження галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC, оскільки це дозволить істотно зменшити витрати, зокрема річна економія за рахунок цього впровадження складає:

$$P_e = 2130,53 - 617,35 = 1513,18 \text{ грн.}$$

Отже, витрати на обробку однієї лопатки зменшаться на 1513,18 грн на рік, а також значно покращиться якість обробки.

Розрахуємо умовно річний економічний ефект за формулою (4.5) [34, с. 6]:

$$E_{\text{ур}} = (C_2 - C_1) \cdot N \quad (4.5)$$

$$E_{\text{ур}} = (2130,53 - 617,35) \cdot 800 = 1210,55 \text{ тис.грн.}$$

Таким чином, річний економічний ефект становитиме 1,2 млн. грн, оскільки саме на цю суму будуть знижені витрати. Окрім цього тривалість ручного полірування набору лопаток складає 36...58 годин (в залежності від габаритів і кількості лопаток в наборі (36...115 штук)), а віброабразивне галтування набору триває 7 годин. Тому можна зробити висновок, що тривалість цієї операції зменшилась, а, відповідно, продуктивність виросла в 5...8 разів.

Отже, впровадження галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC є обґрунтованим та економічно вигідним.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Вступ

Охорона праці є важливим аспектом будь-якої виробничої діяльності, спрямованим на забезпечення здоров'я та безпеки працівників. На сучасних підприємствах працівники перебувають під різноманітними факторами небезпеки, які можуть призводити до тимчасових чи постійних ушкоджень здоров'я, а в деяких випадках — до летальних наслідків. У зв'язку з цим важливим завданням є своєчасне виявлення потенційних загроз і впровадження ефективних методів їх усунення. Однією з таких загроз є шкідливий вплив виробничого пилу, який може негативно впливати на дихальну систему, шкіру, очі та інші органи. Враховуючи високий рівень небезпеки, пов'язаної з пиловими забрудненнями на робочих місцях, а особливо у машинобудівній галузі, важливо знати про основні фактори ризику, запобіжні заходи та дії в екстремальних ситуаціях.

5.2 Небезпека, пов'язана з виробничим пилом

Виробничий пил – це тонкодисперсні тверді частинки, які перебувають у повітрі у зваженому стані. Він є одним з найбільш поширених і небезпечних виробничих факторів, з яким стикаються працівники в різних галузях, таких як гірничодобувна, текстильна, будівельна, машинобудівна, металургійна промисловості, сільське господарство та тощо [36]. Проблема впливу пилу на здоров'я працівників залишається актуальною в багатьох галузях, де пилові забруднення є частиною виробничого середовища.

Пил може бути органічним (рослинним, тваринним), неорганічним (мінеральним, металевим) або змішаним за складом. Важливою є

класифікація пилу залежно від його дисперсності та способу утворення. Пил може утворюватися як аерозоль дезінтеграції (при дробленні твердих речовин) або аерозоль конденсації (при охолодженні парів).

В залежності від розміру частинок, пил поділяється на видимий (частинки більше 10 мкм), мікроскопічний (від 0,25 до 10 мкм) і ультрамікроскопічний (менше 0,25 мкм). Пил з частками менш ніж 5 мкм є найбільш небезпечним, оскільки ці частки можуть проникати в глибокі відділи легенів, потрапляючи до альвеол, тонкостінних структур в легенях, що відіграють ключову роль у процесі дихання, і затримуватись там, що призводить до ризику появи різноманітних захворювань і труднощів із диханням.

Пил може чинити різноманітний вплив на організм, серед яких можна виділити токсичний (наприклад, від марганцевого, свинцевого, миш'якового пилу), дратівливий (вапняний, лужний пил), алергенний (вовняний, синтетичний пил), канцерогенний (сажа), а також пневмоконіотичний, що викликає розвиток хронічних захворювань легенів. Силікоз є одним із найбільш небезпечних варіантів пневмоконіозу, оскільки навіть після припинення контакту з пилом він може прогресувати.

Захворювання, викликані пилом, включають професійні бронхіти, пневмонії, алергічні риніти, бронхіальну астму, а також хвороби очей і шкіри. Наприклад, пил може спричиняти кон'юнктивіт, професійні катаракти, а також сильну сенсibiliзацію слизових оболонок та рогівки очей. Шкіра також страждає від пилу, адже він може викликати дерматити, алергічні дерматити, екземи та фотодерматити.

Важливою проблемою є механічний вплив пилу, що може пошкоджувати цілісність слизових оболонок верхніх дихальних шляхів і очей, а також порушувати функцію шкіри, наприклад, через забруднення сальних і потових залоз. Вчені вже давно визначили, що одним із найнебезпечніших видів пилу на підприємствах є пил утворений від тяжких

металів, серед яких найбільш поширеними у виробництві є свинець, мідь і цинк.

В нещодавніх дослідженнях було виявлено, що навіть в повсякденному житті, в приміщеннях, що знаходяться в районах з інтенсивним рухом транспорту або в промислових районах спостерігається небезпечний для здоров'я рівень свинцю в повітрі [37]. Більш того, така тенденція спостерігається майже по всьому світу – згідно з оцінкою ризику для здоров'я, вплив Pb у пилу є основною проблемою для здоров'я в районах переробки електронних відходів, яка потребує більшої уваги. 49,8%, 36,8% і 14,4% досліджуваних ділянок показали ГДК, що перевищують 35 мкг/л (порогова межа в Німеччині), 50 мкг/л (порогова межа в США) або 100 мкг/л (порогова межа в Китаї), відповідно. Нарешті, у багатьох країнах, що розвиваються, основною причиною отруєння дітей Pb у крові є вплив пилу в приміщеннях [38].

Навіть невеликі кількості тяжких металів в повітрі можуть викликати серйозні захворювання та порушення роботи організму. Однією з найпоширеніших проблем є ураження нервової системи. Свинець та ртуть, наприклад, можуть викликати порушення розумового розвитку у дітей, зниження IQ, проблеми з пам'яттю та концентрацією [39], [40]. У дорослих це може проявлятися головним болем, тремором або порушенням координації рухів [41]. Крім того, важкі метали можуть спричинити хвороби нирок, такі як ниркова недостатність або ушкодження ниркових каналців, особливо під впливом кадмію та свинцю. Вдихання пилу з важкими металами також може призводити до проблем з дихальною системою, включаючи хронічний бронхіт, астму, фіброз легень або навіть рак легень. Серцево-судинна система також страждає: кадмій та свинець підвищують ризик розвитку гіпертонії, атеросклерозу та інших серцевих захворювань [42]. Деякі важкі метали, такі як арсен, кадмій та нікель, є канцерогенними і можуть викликати рак легень, шкіри, сечового міхура та інших органів. Крім

того, важкі метали можуть пригнічувати імунну систему, роблячи організм більш вразливим до інфекцій та хвороб.

Симптоми отруєння важкими металами можуть бути різноманітними. До загальних симптомів належать слабкість, втома, нудота та біль у м'язах. Ураження нервової системи може проявлятися головним болем, запамороченням, порушенням пам'яті та тремором. З боку шлунково-кишкового тракту можуть виникати біль у животі, діарея та блювання. Дихальна система може реагувати кашлем, задишкою або хронічним бронхітом. На шкірі можуть з'являтися висипання, подразнення або зміни пігментації.

Для захисту від шкідливого впливу важких металів важливо уникати тривалого перебування в зонах з підвищеним рівнем забруднення. На виробництві або в забруднених районах слід використовувати засоби індивідуального захисту, такі як маски або респіратори. Регулярне провітрювання приміщень та підтримання чистоти також допомагають зменшити ризик впливу. Здоровий спосіб життя, включаючи харчування, багате на антиоксиданти, допомагає виводити токсини з організму. Пил важких металів – це невидима, але дуже небезпечна загроза, і навіть невелика кількість цих речовин може призвести до серйозних проблем зі здоров'ям, тому важливо вживати заходів для зменшення їх впливу на організм.

5.3 Надзвичайні ситуації, пов'язані з пилом

На промислових підприємствах пил може стати причиною різних надзвичайних ситуацій, які загрожують здоров'ю працівників, безпеці виробництва та навколишньому середовищу. Однією з найнебезпечніших ситуацій є вибухи пилу. Деякі види пилу, такі як деревний, вугільний, металевий або хімічний, можуть утворювати вибухонебезпечні суміші з

повітрям. Це може призводити до руйнування обладнання, пошкодження будівель, травм або навіть загибелі людей. Наприклад, вибухи часто трапляються на вугільних шахтах, деревообробних підприємствах або елеваторах. Ще однією серйозною проблемою є пожежі, оскільки пил легко займається від іскри або високої температури, особливо якщо він накопичується в приміщенні. Пожежі можуть швидко поширюватися, супроводжуючись задимленням та отруєнням продуктами горіння, що становить небезпеку для працівників.

Іншою поширеною надзвичайною ситуацією є задимлення або засмічення повітря через викиди великої кількості пилу. Це може відбуватися через аварії, поломки систем вентиляції або фільтрації. Наслідками таких ситуацій є погіршення видимості, порушення роботи обладнання та небезпека для здоров'я працівників. Наприклад, викиди цементного пилу на будівництві або металевого пилу на металообробних підприємствах можуть призводити до серйозних проблем. Також пил може спричинити масове отруєння працівників, особливо якщо він містить токсичні речовини, такі як важкі метали, азбест або хімічні сполуки. Вдихання такого пилу може викликати гострі або хронічні захворювання, включаючи ураження легень, нирок та нервової системи. Наприклад, отруєння свинцем на металургійних підприємствах або вдихання азбестового пилу на будівництві є досить поширеними явищами.

Ще однією проблемою є аварії через засмічення обладнання. Накопичення пилу в механізмах, електрообладнанні або системах вентиляції може призводити до поломок, коротких замикань або зупинки виробництва. Наприклад, засмічення вентиляційних систем на хімічних заводах може викликати серйозні аварії. Крім того, пил може стати причиною екологічних катастроф, якщо велика кількість пилу потрапляє в навколишнє середовище через аварії або порушення технологічних процесів. Це призводить до забруднення повітря, ґрунту та води, що становить небезпеку для здоров'я

населення. Наприклад, викиди токсичного пилу з металургійних комбінатів можуть мати довготривалі негативні наслідки для екології.

5.4 Заходи безпеки

Для зниження рівня пилової небезпеки на виробництві необхідно взяти низку заходів. Технологічні заходи включають удосконалення процесів виробництва, впровадження безвідходних технологій, автоматизацію та механізацію, заміну сухих процесів на мокрі, а також використання брикетів чи гранул замість порошкових продуктів.

Санітарно-технічні заходи включають герметизацію пилонебезпечного обладнання, встановлення вентиляційних систем, проведення пневматичного прибирання в приміщеннях.

Індивідуальні засоби захисту (респіратори, захисні окуляри, костюми) є важливими для зменшення контакту працівників з пилом. Також необхідно проводити регулярні медичні огляди, щоб своєчасно виявляти професійні захворювання та запобігати їх прогресуванню.

В Україні основою виконання заходів по боротьбі з пилом є гігієнічне нормування, яке здійснюється відповідно «Гігієнічних регламентів хімічних речовин у повітрі робочої зони» затвердженого наказом МОЗ України від 14.07.2020 року № 1596 та ГОСТу 12.1.005-88.

6 ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ВІБРОАБРАЗИВНОГО ГАЛТУВАННЯ ЛОПАТОК ТУРБИНИ З МАТЕРІАЛІВ ЖС26-ВІ, ЖС32-ВІ, ВТ-3, ВТ-8

Технологічні рекомендації включають: умови і режими обробки.

Забезпечити шорсткість: на радіусах вхідних/вихідних кромки Ra 0.8, за профілем пера та радіусами переходів Ra 1.6.

Обробка послідовно (загальний час обробки 7 год):

1 етап:

- обробка із застосуванням керамічного абразиву RCP ZS 09/09;
- рідкий компаунд ZF 113, розведений водою 13%;
- абразивна паста RSP508 1,7 кг;
- подача води в установку вимкн.;
- час обробки 6 год;
- частота механічних коливань 49,5 Гц;
- амплітуда 3...4 мм;
- кількість обертів установки 1500 об/хв.

II етап:

- обробка із застосуванням керамічного абразиву RP ZS 04/05;
- рідкий компаунд ZF 113; розведений водою 13%;
- абразивна паста RSP508 1,7 кг;
- подача води в установку вимкн.;
- час обробки 1 год;
- частота механічних коливань 49,5 Гц;
- амплітуда 3...4 мм;
- кількість обертів установки 1500 об/хв.

ВИСНОВКИ

У першому розділі дипломного проєкту було проведено огляд сучасних методів фінішної обробки, які застосовуються для виготовлення авіаційних лопаток з урахуванням їх специфічних особливостей конструкції. Розглянуто ключові технології, такі як ручне полірування, вібраційна обробка, електрополірування, притирання, суперфініш тощо. Кожен із цих методів має свої переваги, які дозволяють досягти високих стандартів якості поверхні, необхідних для експлуатації в умовах високих температур, тиску та механічних навантажень, і свої недоліки. Аналіз показав, що використання технологій віброабразивного галтування RÖSLER є найбільш практичним і раціональним вибором для фінішної обробки лопаток турбін. Системи RÖSLER забезпечують високу точність, ефективність і повторюваність процесів, що критично важливо для досягнення необхідних експлуатаційних характеристик. Завдяки універсальності цих установок, вони підходять для виконання широкого спектра завдань - від видалення задирок і шліфування до полірування та суперфінішу.

У другому розділі дипломного проєкту розглянуто методіку проведення експериментів, спрямовану на вдосконалення фінішної обробки авіаційних лопаток. Основні етапи дослідження охоплюють вибір зразків, підбір устаткування, визначення режимів обробки, використання відповідних наповнювачів та контроль якості поверхні. Для експериментів використовувалися лопатки з жароміцних сплавів ЖС26-ВІ, ЖС32-ВІ, ВТ-3 та ВТ-8. Їх шорсткість досягала у межах Ra 0,8 мкм на радіусах вхідної та вихідної кромки та Ra 1,6 мкм на інших поверхнях, що є критично важливим для підвищення їх аеродинамічних та експлуатаційних характеристик. Устаткування, застосоване в дослідженнях, включало установки RÖSLER R420 EC, R600/2000 TSD та FSK 06.1 E. Установка RÖSLER R420 EC продемонструвала високу ефективність при обробці як одиничних деталей,

так і великих партій, забезпечуючи контрольовану та повторювану якість обробки. Визначення режимів обробки дозволило підібрати оптимальні параметри, зокрема частоту механічних коливань, тип абразивного середовища та тривалість процесу. Для фінішної обробки використовувалися керамічні наповнювачі Ceramic Media, які забезпечують високу якість поверхні завдяки їх універсальності та адаптивності до складної геометрії деталей. Контроль шорсткості здійснювався за допомогою профілометра PCE-RT 2200, що забезпечує точні вимірювання параметрів Ra , Rz та інших. Крім того, для оцінки стану поверхні використовувався стереомікроскоп Leica M205, який дозволяє аналізувати товщину покриття поверхні.

У третьому розділі дослідження вивчено ефективність техніки віброабразивного галтування для обробки робочих і соплових лопаток газотурбінних двигунів із жаростійкими покриттями. Установлено, що:

- точність усіх досліджених типів лопаток (соплових, робочих та лопаток ТВТ), виміряна за перетинами по технології контролю базового виробництва після ручного полірування і віброабразивного галтування – в межах вимог креслень;

- шорсткість лопаток після ручного полірування 0,2...0,6 мкм, після галтування пера 0,1...1,28 при умові креслень 0,8...1,6 мкм;

- аналіз мікрошліфів після галтування показав, що лопатки не мають схильності щодо погіршення покриття, вони мають стабільну однакову товщину в межах оговореної в технічних вимогах креслень, мікроструктура під покриттям не змінюється; відшарування покриття не спостерігалось.

У четвертому розділі в оцінці очікуваних економічних заходів було впроваджено порівняння галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC до та після установки. Розрахунки показали, що річний економічний ефект становитиме 1,2 млн. грн., оскільки саме на цю суму будуть знижені витрати. Також тривалість цієї операції зменшилась, і, відповідно, продуктивність виросла в 5...8 разів (в залежності від габаритів і кількості

лопаток в наборі (36...115 штук)). До того ж віброабразивне галтування дозволяє відмовитись від ручної праці на фінішному етапі виготовлення лопаток турбіни ГТД. Отже, впровадження галтувальної кругової віброустановки RÖSLER R420 EC є обґрунтованим та економічно вигідним.

У п'ятому розділі охорони праці було розкрито вплив пилу на організм людини. Особливу увагу було приділено виробничому пилу, що виникає на підприємствах. Було доведено, що пил важких металів вкрай негативно впливає на організм людини. Була запропонована низка заходів з техніки безпеки, для мінімізації та уникнення травм пов'язаних з надлишком пилу у повітрі.

В шостому розділі приведено технологічні рекомендації щодо двоетапної обробки лопаток турбіни ГТД віброабразивним поліруванням.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Тексти (конспект) лекцій з дисципліни «Конструкція та проектування АД та ЕУ» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / Укл. Д.М.Степанов – НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 87 с.
2. Новий ливарний завод з виробництва компонентів лопаток турбін та лопатей [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://onv.com.ua/novosti/biznes/novuj-litejnyj-zavod-po-proizvodstvu-komponentov-lopatok-turbin-i-lopastej/> (дата звернення: 26.11.2024) – Назва з екрана
3. Blade Roughness Effects on Compressor and Engine Performance—A CFD and Thermodynamic Study [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/aerospace8110330> (дата звернення: 26.11.2024) – Назва з екрана.
4. Гальванізація металу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://gmt.net.ua/novini/galvanizaciya-metalu/?utm_source (дата звернення: 26.10.2024) – Назва з екрана.
5. Типи покриттів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.kipt.kharkov.ua/kipt_sites/isspmst/main_site/UKR13Coat.html (дата звернення: 28.10.2024) – Назва з екрана.
6. Авіаційні матеріали та їх технології конспект лекцій / Ю.В. Ключников, О.Т. Сердітов, В.Л. Дубнюк – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 114с.
7. What is Electropolishing? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.besttechnologyinc.com/electropolishing-equipment/how-does-electropolishing-work/#:~:text=Electropolishing%20is%20an%20electrochemical%20finishing,%2C%20ultra%2Dclean%20surface%20finish> (дата звернення: 03.09.2024) – Назва з екрана.

8. Electropolishing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electropolishing> (дата звернення: 03.09.2024) – Назва з екрана.
9. Осадца Я.М. Конспект лекцій з дисципліни “Технологія електротехнічного виробництва” (для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). // Я.М. Осадца, В.А. Андрійчук, Л.М. Костик – Тернопіль: ТНТУ 2023 – 182 с.
10. Интегрированные технологии обработки материалов [Текст]: підручник / Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофеева, В.П. Нерубацький та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – 238 с., рис. 56, табл. 2.
11. Нетрадиційні методи механічної обробки матеріалів : конспект лекцій / укладачі: Б. А. Ступін, О. В. Івченко, О. Д. Динник, Р. М. Зінченко. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 149 с.
12. Steel superfinishing (short-stroke honing) with your reliable production partner [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.lingenhoele.at/en/mechanical-production/super-finishing/> (дата звернення: 10.09.2024) – Назва з екрана.
13. Притирання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F> (дата звернення: 11.09.2024) – Назва з екрана.
14. Superfinishing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Superfinishing> (дата звернення: 11.09.2024) – Назва з екрана.
15. Суперфініш абразивними стрічками [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://stud.com.ua/36378/tovaroznavstvo/superfinish_abrazivnimi_strichkami (дата звернення: 11.09.2024) – Назва з екрана.

16. Що таке шліфування: визначення, методи та застосування? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.want.net/uk/what-is-grinding-definition-methods-applications/> (дата звернення: 13.09.2024) – Назва з екрана.
17. Шліфування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://stud.com.ua/36366/tovaroznavstvo/shlifuvannya> (дата звернення: 13.09.2024) – Назва з екрана.
18. Стрічкове алмазно-абразивне полірування деталей обертання зі зносостійких композитів на основі алюмінію для поліграфічних машин / А. П. Гавриш, П. О. Киричок, Т. А. Роїк, Ю. Ю. Віцюк, С. М. Зигуля // Технологія і техніка друкарства : збірник наукових праць. – 2015. – Вип. 1(47). – С. 85–102.
19. Polishing and grinding large steam turbine blades on the MTS machine tool [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.youtube.com/watch?v=oCO1UqrQoBE&ab_channel=IMM_MaschinenbauGmbH (дата звернення: 15.09.2024) – Назва з екрана.
20. Основи обробки металевих виробів з оптичними властивостями : монографія / Ф. В. Новіков, В. Г. Шкурूपій. – Х. : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. – 388 с.
21. World-class mass finishing solutions for your perfect surface [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rosler.com/en/products/mass-finishing> (дата звернення: 20.09.2024) – Назва з екрана.
22. High energy disc systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rosler.com/en/products/mass-finishing/high-energy-disc-systems> (дата звернення: 21.09.2024) – Назва з екрана.
23. Технологічне забезпечення і прогнозування несучої здатностей деталей ГТД / В.А. Богуслаєв, В.К. Яценко, В.Ф. Притченко – Київ 1993. – 331с.
24. Ceramic media [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rosler.com/en/products/consumables/ceramic-media> (дата звернення: 24.09.2024) – Назва з екрана.

25. Effect of Surface Roughness on the Aerodynamic Characteristics of a Symmetrical Airfoil [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1260/0309524043028136> (дата звернення: 27.11.2024) – Назва з екрана.
26. ZhS26-VI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aloro.net/grades/su/gr-gs26-vi> (дата звернення: 01.10.2024) – Назва з екрана.
27. ZhS32-VI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aloro.net/grades/su/gr-gs32-vi> (дата звернення: 01.10.2024) – Назва з екрана.
28. Характеристика матеріала ВТ3-1 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1297 (дата звернення: 01.10.2024) – Назва з екрана.
29. Характеристика матеріала ВТ8 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1801 (дата звернення: 01.10.2024) – Назва з екрана.
30. Rotary vibrator [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rosler.com/en/products/mass-finishing/rotary-vibrator> (дата звернення: 15.10.2024) – Назва з екрана.
31. Tub vibrators [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rosler.com/en/products/mass-finishing/tub-vibrators> (дата звернення: 17.10.2024) – Назва з екрана.
32. PCE-RT 2200 професійний профілометр [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://pragmatic.com.ua/pce_rt2200?srsId=AfmBOopFy0Nq3Wlgtk24pr41Yk8TukKwtHjrsQFurbwCjBZN3I3UbK0t (дата звернення: 21.10.2024) – Назва з екрана.
33. Мікроскоп для матеріалознавства Leica DM 2700 з LED освітлювачем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://intero.ua/micro/leica->

- microsystems/stereoskop/43-leica-m205.html (дата звернення: 24.10.2024) – Назва з екрана.
34. Методичні рекомендації для дипломного проєктування “Оцінка економічної ефективності технічних рішень” для студентів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / Укл. Г.В. Пухальська - Запоріжжя: НУ«Запорізька політехніка», 2023 - 41 с.
35. Економіка і організація виробництва: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за технічними та інженерними спеціальностями / Петренко К. В., Скоробогатова Н. Є. - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 177 с.
36. Вплив виробничого пилу на стан здоров'я працюючих [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.oblses.ck.ua/index.php?Itemid=57&catid=41%3A2013-05-13-02-14-47&id=2274%3A2021-06-24-08-28-50&option=com_content&view=article&utm_source= (дата звернення: 09.11.2024) – Назва з екрана.
37. Tan S. Y. et al. A review of heavy metals in indoor dust and its human health-risk implications //Reviews on environmental health. – 2016. – Т. 31. – №. 4. – С. 447-456.
38. Shi T., Wang Y. Heavy metals in indoor dust: Spatial distribution, influencing factors, and potential health risks //Science of the Total Environment. – 2021. – Т. 755. – С. 142367.
39. Lanphear, B. P., Hornung, R., Khoury, J., Yolton, K., Baghurst, P., Bellinger, D. C., & Roberts, R. (2005). Low-level environmental lead exposure and children's intellectual function: an international pooled analysis. *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 894-899.
40. World Health Organization (WHO). (2010). Childhood lead poisoning. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/childhood-lead-poisoning>

41. Shih, R. A., Glass, T. A., Bandeen-Roche, K., Carlson, M. C., Bolla, K. I., Todd, A. C., & Schwartz, B. S. (2006). Environmental lead exposure and cognitive function in community-dwelling older adults. *Neurology*, 67(9), 1556-1562.
42. Navas-Acien, A., Guallar, E., Silbergeld, E. K., & Rothenberg, S. J. (2007). Lead exposure and cardiovascular disease—a systematic review. *Environmental Health Perspectives*, 115(3), 472-482.