

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний

(повне найменування факультету)

Технологія машинобудування

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

другий (магістерський)

(ступінь вищої освіти)

на тему «Забезпечення високої продуктивності фінішно-оздоблювальної
обробки титанових лопаток ГТД»

Виконав: студент(ка) II курсу, групи М-112м

Спеціальності 131 Прикладна механіка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Технології машинобудування

СЛОБОДЯН А.Г.

(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 (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Сергій ДЯДЯ
« » 2023 року

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

СЛОБОДЯН Анастасія Геннадіївна
(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Забезпечення високої продуктивності фінішно-оздоблювальної обробки титанових лопаток ГТД»

керівник проєкту (роботи) к.т.н ., доц. ГОНЧАР Наталя Вікторівна
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові,)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» 11 2023 року №436

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 20.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Креслення деталі і проєктне завдання; річна програма випуску N=65 шт.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Забезпечення якості поверхні і продуктивності обробки аеродинамічних поверхонь лопаток; 2. Аналіз можливостей фінішних методів обробки лопаток ГТД. Аналіз літературних джерел; 3. Методика проведення досліджень; 4. Проведення і оцінка результатів експерименту; 5. Розрахунок на міцність; 6. Оцінка очікуваної економічної ефективності розробки; 7. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)
Кількість слайдів – 17 шт.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-6	к.т.н., доц. ГОНЧАР Н.В.		
6	к.т.н., доц. ПУХАЛЬСЬКА Г.В.		
7	к.т.н., доц. ШМИРКО В.І.		
нормоконтроль	к.т.н., доц. ДЯДЯ С.І.		

7. Дата видачі завдання 04 вересня 2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Забезпечення якості поверхні і продуктивності обробки аеродинамічних поверхонь лопаток	13.09.2023	
2	Аналіз можливостей фінішних методів обробки лопаток ГТД. Аналіз літературних джерел	28.10.2023	
3	Методика проведення досліджень	01.10.2023	
4	Проведення і оцінка результатів експерименту	23.10.2023	
5	Розрахунок на міцність	06.11.2023	
6	Економічний розрахунок	10.11.2023	
7	Охорона праці	15.11.2023	
8	Оформлення пояснювальної записки та презентації	22.11.2023	
9	Нормоконтроль	18.12.2023	
10	Рецензія	18.12.2023	
11	Захист дипломного проєкту	20.12.2023	

Студент(ка)

(підпис)

Анастасія СЛОБОДЯН

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

Наталя ГОНЧАР

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 92 с.; 47 рис.; 13 таб.; 2 дод.; 34 джерело.

ВИСОКОШВИДКІСНЕ ФРЕЗЕРУВАННЯ, ВІБРОАБРАЗИВНА УСТАНОВКА, ВІБРОПОЛІРУВАННЯ, ЛОПАТКИ КВТ, МІЦНІСТЬ, ТИТАНОВИЙ СПЛАВ

Об'єкт дослідження – лопатки 1 ступеню КВТ авіаційного двигуна Д-18Т з титанового сплаву ВТ 8.

Предмет дослідження – фінішний етап виготовлення лопаток.

Метою магістерського проєкту було:

–зниження загальної трудомісткості виготовлення лопаток компресора за рахунок зменшення долі, або повного виключення з технологічного процесу операції ручного полірування після високошвидкісного фрезерування на верстатах з ЧПУ «Starrag»;

–підвищення якості поверхні профілю пера при виготовленні робочих лопаток компресора (усунення мікродефектів поверхні, що наводяться при ручному поліруванні);

–відпрацювання режимів віброполірування лопаток в умовах технологічного процесу виготовлення;

–оцінка отриманих результатів порівняно із заданими кресленням вимогами параметру шорсткості поверхні профілю та збереженню геометричних розмірів профілю по перерізах пера лопатки.

Методи дослідження - Розрахунково-аналітичний, метод простої моделі і комп'ютерна візуалізація та моделювання робочого навантаження деталі.

Досліджували лопатки 1 ступеню КВТ з титанового сплаву ВТ 8. Усі лопатки було відібрано після операції фрезерування профілю пера.

Дослідження проводили на базі ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес».

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	7
1 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ І ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБКИ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ЛОПАТОК	8
1.1 Особливості фінішного етапу виготовлення титанових лопаток	8
1.2 Загальні відомості про формоутворюючі та фінішні операції обробки досліджуваних лопаток.....	10
1.2.1 Опис технології ВШФ	10
1.2.2 Ручне полірування лопаток за допомогою полірувальної бабки	13
1.3 Постановка задачі дослідження.....	14
2 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ФІНІШНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ЛОПАТОК ГТД. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	17
2.1 Аналіз технології стрічкового шліфування.....	17
2.2 Технології електрофінішної обробки.....	20
2.3 Технологія дробоструминної обробки	22
2.4 Піскоструминна обробка та її особливості.....	26
2.5 Обробка в псевдозрідженому абразиві	30
2.6 Особливості віброполірування	35
3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	43
3.1 Об'єкт дослідження.....	43
3.2 Обладнання та оснастка для проведення досліджень	44
3.3 Методи дослідження.....	44
4 ПРОВЕДЕННЯ І ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	47
4.1 Підготовка та проведення робіт.....	47
4.2 Обробка результатів експериментів партій №1, 2, 3	49
4.3 Обробка результатів експериментів партій № 4, 5, 6	53
4.4 Оцінка отриманих результатів.....	55
4.5 Технологічні рекомендації	59

5 РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ	60
5.1 Вихідні дані.....	60
5.2 Розрахунок на міцність.....	61
5.3 Результати розрахунку.....	69
6 ОЦІНКА ОЧІКУВАНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ .	71
7 ОХОРОНА ПРАЦІ	80
7.1 Вплив титану на здоров'я людини	80
7.2 Мінімізація впливу та токсичних ефектів	81
7.3 Вентиляція над шліфувальним обладнанням.....	82
7.4 Розрахунок місцевої вентиляції.....	84
ВИСНОВОК.....	85
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	87

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

FEM	Finite Element Method (метод кінцевих елементів)
ВАП	Віброабразивне полірування
ВШФ	Високошвидкісне фрезерування
ГТД	Газотурбінний двигун
ЕО	Електрофінішна обробка
КВТ	Компресор високого тиску
ПЗА	Псевдозріджений абразив
СШ	Стрічкове шліфування
ЧПК	Числове програмне керування

1 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ І ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБКИ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ЛОПАТОК

1.1 Особливості фінішного етапу виготовлення титанових лопаток

З розвитком передових технологій виготовлення авіаційних двигунів у напрямку високого співвідношення тяги до ваги та легкості з'явилась низка легких авіаційних матеріалів, таких як титанові жароміцні сплави та композитні матеріали на основі кераміки, які широко використовуються для ключових компонентів в аерокосмічній галузі, а також стали основними виробничими матеріалами для лопаток авіаційних двигунів. Титан - легкий метал, набагато легший за залізо - густина 4507 кг/м^3 . Застосовується в аерокосмічній (двигуни), військовій, металургійній, автомобільній, медичній (протезування), екстремальних видах спорту та інших галузях. Найпоширенішою формою виходу з ладу є механічні пошкодження внаслідок високих циклічних навантажень, викликаних вібраціями. Титановий сплав має низьку твердість, низьку зносостійкість і відносно погані втомні властивості. Слід підкреслити, що титан важко піддається механічній обробці.

Для покращення експлуатаційних властивостей титанових сплавів при застосуванні в різних галузях промисловості їх необхідно піддавати поверхневій та фінішній обробці. У процесі роботи лопатки (рис. 1.1) газотурбінних двигунів (ГТД) протидіють високим динамічним і термічним циклічним навантаженням. Через це підвищуються вимоги до стану поверхневого шару, до рівня опору втомі. Зародження втомної тріщини за багатоциклічних навантажень зазвичай починається з місць поверхневих технологічних концентраторів напружень.

Поліпшення якості поверхні і властивостей поверхневого шару лопаток, одержуваних на фінішних операціях, підвищує їхню довговічність, зносостійкість і термін експлуатації. Лопатки досить трудомісткі у виготовленні, і значну частину процесу обробки складають фінішні операції.

Фінішна обробка забезпечує сприятливе поєднання якості поверхні і властивостей поверхневого шару. При цьому вона так само може призводити до появи технологічних концентраторів напружень, таких як риски, подряпини, мікротріщини тощо. Однак через чутливість матеріалів до концентрації напружень, на перший план виходить проблема втомного руйнування. Існуючі дослідження показують, що характеристики опору втомі лопаток авіаційних двигунів мають важливий взаємозв'язок з процесом їх обробки, що, в свою чергу, впливає на експлуатаційні характеристики і термін служби обладнання [1].



Рисунок 1.1 – Лопатки ГТД [2]

Кожне підприємство, яке так чи інакше пов'язане з виготовленням лопаток, веде пошук, розробляє і вдосконалює технології фінішного етапу їх виготовлення з метою: автоматизації процесу, забезпечення сприятливого поєднання властивостей поверхневого шару, підвищення продуктивності. Для лопаток, перо яких було виготовлене досить прогресивним методом високошвидкісного фрезерування (ВШФ), технології фінішного оброблення повинні враховувати технологічну спадковість. Це пов'язано зі специфічним мікрорельєфом поверхонь, а саме з так званими "строчками", які залишаються після обробки ВШФ. Їх величина, форма та періодичність розташування залежить від умов і режимів ВШФ. Ручне полірування на полірувальній бабці за допомогою декількох кругів послідовно, яке довгий час застосовувалось для фінішно-оздоблювального оброблення пера лопаток, мало більше недоліків,

ніж переваг, зокрема низьку продуктивність та деяку нестабільність результатів, і все одно вимагала наступного тонкого полірування, щоб заполірувати наведені risks на поверхнях пера.

Через вищесказане, і через те, що фінішна обробка, як остаточний процес видалення матеріалу з пера лопаток, безпосередньо визначає кінцеву цілісність поверхні і опір втомі при отриманні точних профілів, а також загальну трудомісткість ТП виготовлення лопаток, - то пошук, аналіз і дослідження нових сучасних автоматизованих фінішних методів є актуальною задачею.

1.2 Загальні відомості про формоутворюючі та фінішні операції обробки досліджуваних лопаток

Існує багато різновидів аеродинамічних поверхонь пера, і відповідно процеси їх обробки також відрізняються. Одним з видів технології отримання пера лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) є фрезерування, його більш прогресивний вид – ВШФ з подальшим фінішингом [3], [4].

1.2.1 Опис технології ВШФ

Технологія високошвидкісної обробки (рис. 1.2) відіграє надзвичайно важливу роль майже у всіх галузях обробної промисловості і представляє інтерес для дослідників як передова технічна проблема. Використання цієї технології є ефективним методом підвищення продуктивності завдяки високій швидкості знімання матеріалу, не вимагаючи при цьому великих обсягів і розмірів верстата. ВШФ – це метод обробки металу, який використовується на

верстатах з ЧПК. Швидкість інструменту і швидкість подачі набагато вищі, ніж при традиційному різанні, що робить товщину зрізу меншою, тому стружка буде тоншою, ніж при традиційному різанні. Відповідно до кривої Соломона [5], якщо швидкість різання висока до певного рівня (наприклад, в десять разів вище традиційної швидкості різання), температура різання буде нижчою, ніж при традиційному різанні.

Одним із значних досягнень є впровадження високошвидкісних мікрофрезерних верстатів. Оскільки дослідження зміщуються в бік виготовлення мікро/нанорозмірних деталей, в яких точність розмірів і точність є найважливішими факторами, ці мікромашинні верстати відіграватимуть значну роль і зможуть задовольнити бажані вимоги [5].

Водночас, це відкриває широке поле для досліджень, таких як розробка мікроскопічних ріжучих інструментів, верстатів з підвищеною стабільністю, усунення шумів при обробці, високим рівнем гасіння вібрації та оптимізацією параметрів процесу.

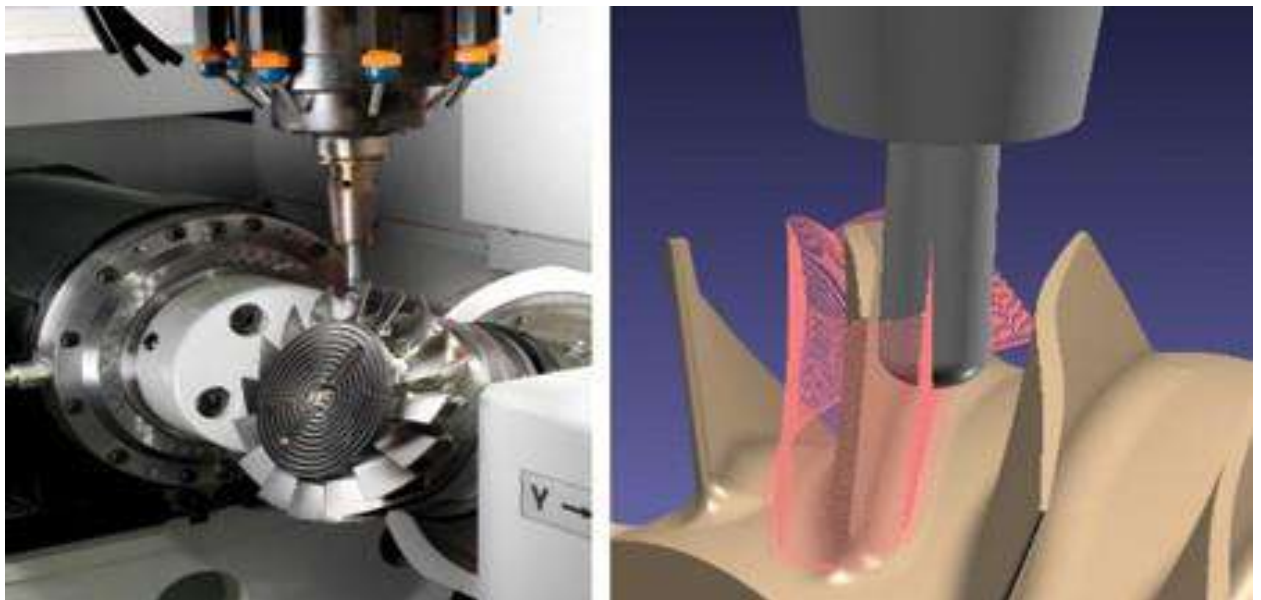


Рисунок 1.2 – Дійсне та змодельоване зображення ВШФ [6]

Завдяки вдосконаленню верстатів, ВШФ була впроваджена в металообробній промисловості, електронній промисловості, виробництві

штампів і прес-форм, точному виробництві та біомеханічному застосуванні для обробки біометалів.

Переваги:

1. Швидкість подачі високошвидкісного фрезерного верстата в 5-10 разів перевищує швидкість традиційного різання, що дозволяє заощадити близько 30% часу обробки.

2. Сила різання вимагає меншого зусилля, тому нею можна обробляти тонкостінні заготовки, наприклад, алюмінієві деталі з товщиною стінки 0,5 мм.

3. Покращується точність обробленої поверхні, що може заощадити традиційну чорнову обробку (через високу швидкість зняття матеріалу при високошвидкісному різанні) та чистову обробку (через високу точність поверхні при високошвидкісному різанні).

4. Швидкість різання вища за швидкість теплопровідності. Більша частина тепла залишається на стружці і не може бути передана заготовці. Це також дозволяє уникнути деформації заготовки через нагрівання.

5. Для високошвидкісного різання також можна використовувати тверді матеріали, навіть матеріали з твердістю HRC60 (наприклад, деталі з легованої сталі після термічної обробки). Таким чином, після обробки не потрібен додатковий процес загартовування, а також усувається ризик процесу загартовування.

Недоліки:

1. Надвисока швидкість високошвидкісного фрезерування вимагає обладнання для поліпшення захисту безпеки на робочому місці. Дрібна стружка на високих швидкостях матиме досить високу швидкість польоту, яка може навіть перевищувати швидкість польоту рушничної кулі.

2. Інструмент легше зношується, що зменшує термін його служби. Але час, необхідний для обробки матеріалу, також скорочується.

3. Високошвидкісне різання також має високі вимоги до збалансованості інструменту. Дисбаланс може призвести до пошкодження інструменту з великою силою і сильно вплинути на положення шпинделя.

4. Через надзвичайно високу швидкість і навантаження при високошвидкісному різанні швидкість споживання компонентів висока. Часто потрібне регулярне технічне обслуговування верстата, заміна шпинделя та інструменту.

1.2.2 Ручне полірування лопаток за допомогою полірувальної бабки

Під час ручної фінішної обробки для обробки складнопрофільних деталей використовуються ручні фінішні пристрої (наприклад, ручна стрічкова шліфувальна машина, електрична полірувальна машина) з абразивними стрічками або пелюстковим кругом. Для обробки лопаток використовують найбільше розповсюджену полірувальну бабку – верстак полірувальний ТМ-2 (рис. 1.3) – закордонний аналог більш сучасний шліфувально-полірувальний верстат JET. Якість кінцевої, обробленої такими методами, поверхні повністю залежить від досвіду та навичок робітників. Тому це неефективний, дорогий, довготривалий і монотонний процес фінішної обробки з поганими умовами праці.



Рисунок 1.3 –Процес ручного полірування лопаток [7]

Як традиційний метод фінішної обробки, ручна обробка

використовується для видалення переплавлених шарів, шарів корозії та слідів від інструментів на поверхнях лопаток. Кінцева шорсткість поверхні R_a часто знаходиться в діапазоні 0,4-0,8 мкм, при цьому утворюється нерегулярна текстура поверхні. У практичному застосуванні може виникнути небажана форма передньої/задньої кромки (наприклад, гранована передня кромка або утворення рисок, прижогів).

Переваги: точність, відсутність «строчок», недороге обладнання.

Основні недоліки використання ручної фінішної обробки лопаток полягають у наступному:

1. Може бути отримана нерівномірна текстура поверхні, що впливає на аеродинамічні характеристики авіадвигунів.
2. Цей метод є досить неефективним і трудомістким для фінішної обробки поверхонь лопаток.
3. Важко досягти цільової точності профілю. Якість повністю залежить від людського фактору.
4. Велика кількість проміжних замірів розмірів по перетинах лопатки.
5. Праця довготривала, монотонна і дуже відповідальна, що тримає робітника в постійному напруженні через страх допустити невиправний брак.
6. Необхідність вентиляції через абразивний пил.

1.3 Постановка задачі дослідження

Попередньо, впроваджуючи високошвидкісне фрезерування (ВШФ) на пері залишали припуск під ручне полірування, який видаляли вручну разом з «строчками» - це періодичні нерівності на поверхнях леза, сліди від фрези (рис. 1.4) - шліфувальними і полірувальними кругами на полірувальному верстаті, послідовно використовуючі круги з меншою зерністю. Періодично лопатку перевіряли на спеціальному контрольному пристосуванні, на розміри

по перетинам лопатки.

«Строчки» після тонкого фрезерування були набагато меншими, але це було нераціонально з точки зору додаткового використання дорогих фрез, часу верстата і інших ресурсів. Тому зупинились на чорновому, напівчистовому і чистовому етапах фрезерування і наступному ручному поліруванні, яке було дуже трудомістким.

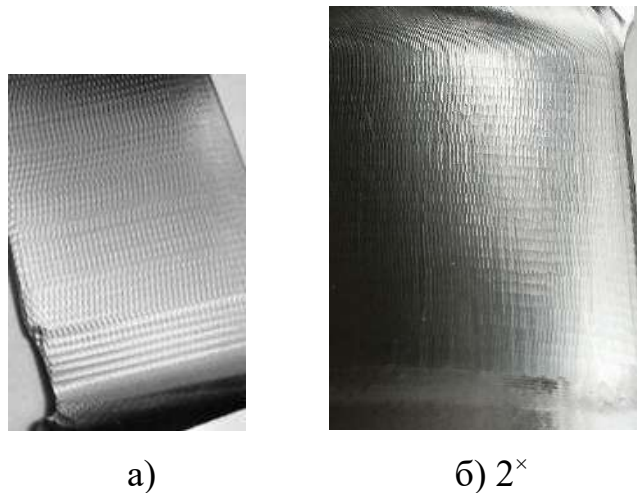


Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд «строчок» лопаток 1 ступеню (а) і 4 ступеню (б) КВТ двигуна Д-18.

Фрезерування заготовок проводилося на верстаті з ЧПК «Starrag SX051 В/С». Наступною метою стало зниження трудомісткості виготовлення лопаток компресора за рахунок виключення з технологічного процесу операції ручного полірування. Це досягається зміною стратегії обробки профілю пера титанових лопаток, а саме: 1-й крок - оптимізація режимів і етапів фрезерування на верстатах з ЧПК «Starrag»; 2-й крок - вибір раціонального фінішного методу, який забезпечує продуктивну якісну обробку складнопрофільного пера, бажано автоматизовану, гарантоване видалення «строчок», шорсткість за кресленням $Ra0,4$ мкм, точність по перетинам, сприятливі властивості поверхневого шару, і, в результаті, достатню границю витривалості, тобто опір втомі.

Перший крок було виконано наступним чином. При фрезеруванні вибрали оптимальну послідовність фрез з варіантами режимів, прибрали напівчистове фрезерування фрезою $\varnothing 12$ мм, прибрали припуск, який залишали для ручного полірування, для отримання мінімальної величини «строчок» і прийнятних витрат часу. Основним фактором, що впливає на «строчки» є подача фрези S_0 (або крок між «строчками»), від якої залежить зовнішній вигляд лопатки після фрезерування і вибір наступних етапів обробки. Чим вона менше, тим менші «строчки», але більше часу обробляється лопатка. Тому було знайдено компроміс – визначено наступні режими: фреза $\varnothing 3,2$ мм, $t = 0,7$ мм; $S = 0,1 \dots 0,15$ мм/об ($S_{\text{зуб}} \geq 0,040$ мм/зуб); $V_p = 80$ м/хв, час виконання цього етапу 18 хв (технічний звіт «Впровадження в ТП виготовлення лопаток фрезерування профілю пера без припуску» – ДП «Івченко-Прогрес»).

Завданням цієї магістерської роботи є другий крок – вибір раціонального фінішного методу обробки титанових лопаток після ВШФ, який забезпечує:

- можливість обробки складного профілю аеродинамічних поверхонь пера при наявності тонких крайок;
- високу продуктивність процесу;
- точність по перетинам відповідно робочому кресленню;
- високу якість, тобто гарантоване видалення «строчок», шорсткість за кресленням $Ra_{0,4}$ мкм;
- сприятливі властивості поверхневого шару;
- достатній опір втомі, тобто границю витривалості, не нижче заявленої для даних лопаток компресора високого тиску (КВТ) ($\sigma_{-1} = 400$ МПа).

2 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ФІНІШНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ЛОПАТОК ГТД. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

2.1 Аналіз технології стрічкового шліфування

Лопатка ГТД є ключовим компонентом авіаційного двигуна. Геометрична точність і якість обробки поверхні безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики авіадвигуна [8]. Через деформацію тонкої стінки робочої лопатки, вузький прохід між лопатками, вільну поверхню робочої поверхні лопатки та складну механічну обробку матеріалу (Ti-6-4), точна обробка поверхні робочої лопатки завжди була ключовою проблемою в галузі авіаційного виробництва.

Термін "стрічкове шліфування" (СШ) описує технологію видалення стружки, яка використовується для фінішної обробки поверхонь за допомогою нескінченних абразивних стрічок і відповідних шліфувальних машин. Ця технологія зазвичай передбачає використання менших стрічок, встановлених на ручних машинах (наприклад, стрічкових шліфувальних машинах, ручних стрічкових шліфувальних машинах, стрічкових шліфувальних машинах для труб), або використання більших стрічок, встановлених на стаціонарних широких стрічкових шліфувальних машинах (наприклад, шліфувальних верстатах на п'єдесталі, довгих/широких стрічкових шліфувальних машинах) [9].

СШ є високоефективним процесом, який можна застосовувати в широкому діапазоні - від профільного шліфування (яке вимагає більшого зняття матеріалу) до полірування відповідних поверхонь [9].

Завдяки високій ефективності, високій точності, гнучкості та холодному шліфуванню, технологія СШ вважається одним з найвідоміших методів обробки деталей з титанових сплавів. В даний час [8] прецизійна обробка поверхні лопатки моноколеса виконується частково ручним шліфуванням. Для підвищення ефективності обробки та якості обробки застосовується

поєднання технології шліфування абразивною стрічкою та багатокоординатних верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК). В експериментальних умовах процесу стрічкового шліфування пера лопатки, в процесі шліфування виникають різні ступені вібраційних явищ, що має великий вплив на точність розмірів, цілісність поверхні і якість всього профілю полотна леза. Лопатка є тонкостінною деталлю, і стабільність її обробки має великий вплив на точність профілю.

На (рис. 2.1) показано модель вібраційного стрічкового шліфування. Основним принципом обробки є підтримання постійного кута між контактним стрижнем шліфувальної головки та поверхнею заготовки; контактне колесо підтримує шліфувальну стрічку і наближає її до поверхні пера лопатки, під дією позитивного тиску. Колесо кочення приводить шліфувальну стрічку в рух з постійною лінійною швидкістю, в той час як шліфувальна головка здійснює поздовжній рух подачі.

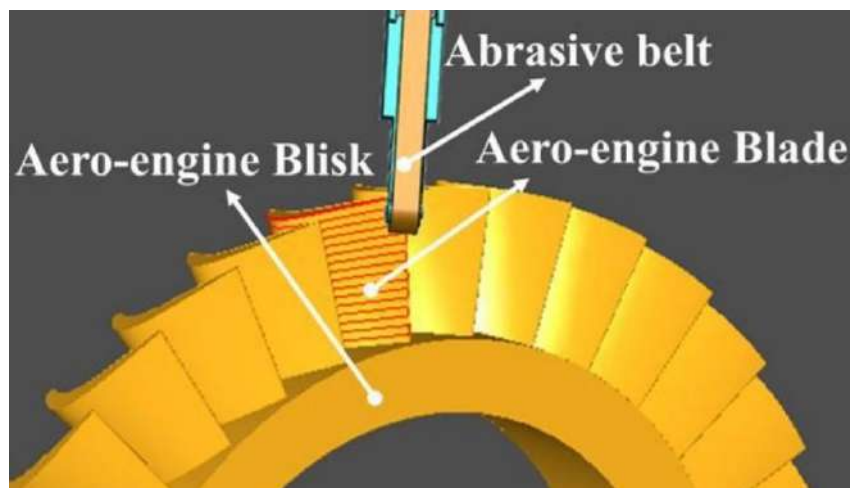


Рисунок 2.1 – Зображення алгоритму обробки лопатки моноколеса при стрічковому шліфуванні [10]

Зручність даної технології полягає в тому, що кронштейн з абразивною стрічкою рухається запрограмованим чином, та ретельно обробляє кожну лопатку турбінного диску. Та попри це такий метод обробки також залишає по собі явні сліди після полірування (рис. 2.2).



Рисунок 1.2 – Зображення лопатки ГТД після обробки СШ [9]

У процесі шліфування легко утворюються три послаблюючих жорсткі умови шліфування фактори, що складаються з тонкостінного леза лопатки, подовженого кронштейна та гнучких контактних кругів. Це серйозно впливає на стабільність шліфування стрічкою, що, в свою чергу, впливає на якість шліфування поверхні пера лопатки. При цьому в роботі [10] отримано закон впливу кожного параметра процесу на межу стійкості шліфування, що призвело до покращення якості шліфування, шорсткості поверхні лопатки та точності профілю лопатки після оптимізації процесу. Цього також вдалося досягнути, завдяки самостійно розробленому шестикоординатному високоточному стрічковому шліфувальному верстаті з ЧПК з новою абразивною стрічковою шліфувальною головкою.

Тобто попри наявні переваги – точність і можливість обробляти криволінійні поверхні, метод має значні недоліки – нестабільність обробки через вібрації, невисоку продуктивність і високу вартість обладнання та оснастки.

2.2 Технології електрофінішної обробки

Електрофінішна обробка (ЕО) або електрополірування – це високоточний процес обробки поверхні металевих заготовок за допомогою зовнішнього джерела живлення. У цьому процесі електрохімічного видалення заготовка занурюється в спеціальний електрохімічний розчин і видаляється анодом. ЕО в основному використовується для вирівнювання та полірування поверхонь [11]. Процес особливо ефективний при обробці складних матеріалів, таких як нержавіюча сталь, титан та інші сплави. Результатом застосування ЕО є заготовки з металевою чистою поверхнею, непошкодженою основною структурою, підвищеною корозійною стійкістю і постійно блискучою поверхнею. ЕО має численні переваги перед іншими методами обробки поверхні [11]. Це швидкий, ефективний і точний метод отримання високоякісних поверхонь, які відповідають високим вимогам сучасної промисловості, який до того ж використовує сучасне високотехнологічне обладнання (рис. 2.1, 2.2).



Рисунок 2.1 – Установка для електрофінішної обробки OTEC EF-Series [12]

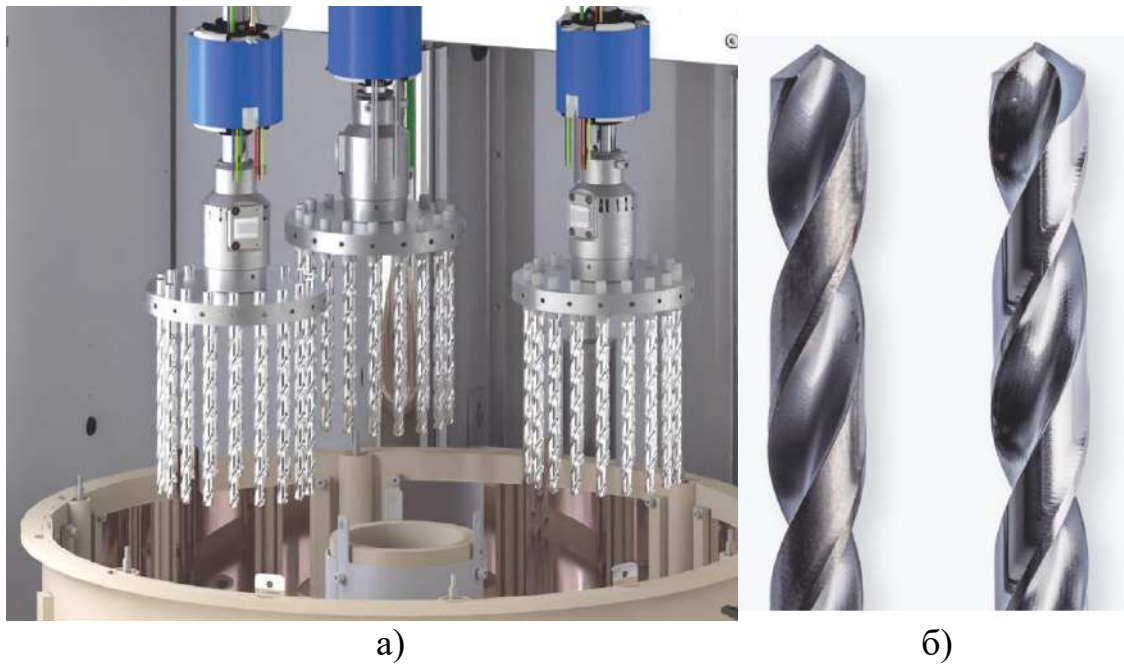


Рисунок 2.2 – Відображення тримачів з заготовками-свердлами (а) в установці OTEC EF-Series всередині, та фрез до та після обробки (б) [12]

Цей процес використовується для розплавлення надтонких нерівностей і перетворення об'єктів на гладкі металеві поверхні. Матеріал поміщають в електролітичний полірувальний розчин, а металевий матеріал використовують як анод для проведення постійного струму (рис. 2.3) [11].

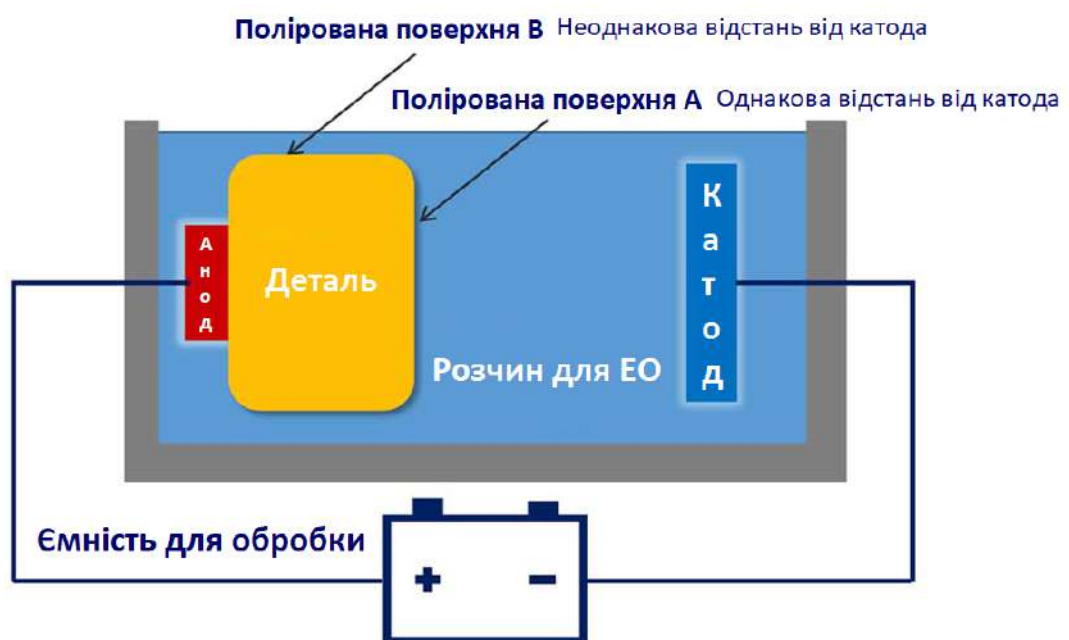


Рисунок 2.3 – Конфігурація обладнання для ЕО

Особливості ЕО: оброблена поверхня стає гладкою і дзеркальною, на сталевих деталях утворюється щільна пасиваційна плівка, варіаціями складу робочої рідини можна використовувати процес для одночасного покриття хромованим шаром з відмінною корозійною стійкістю [11].

Також перевагою методу є те, що дрібний порошок і бруд з меншою ймовірністю прилипають і затримуються. Їх вплив на виріб малоймовірний.

Недоліками даного методу обробки є низька трудомісткість процесу, дороговартісне обладнання, ЕО може видалити занадто багато матеріалу особливо з тонкостінних крайок; необхідність утилізувати небезпечні відходи, та видаляти вентиляцією небезпечні випари [11]. До того ж титан є поганим провідником струму, тому цей метод не є продуктивним.

2.3 Технологія дробоструминної обробки

Дробоструминна обробка є одним з методів фінішно-оздоблювальної обробки, полягає в нанесенні ударів металевого дробу на обраний матеріал. Дробоструминна обробка застосовується майже в усіх галузях промисловості, де використовуються метали або тверді речовини, і допомагає поліпшити зовнішній вигляд, властивості та міцність матеріалу. Видаляє будь-які непотрібні елементи з обраного матеріалу. Проста в процесі, але складна у виконанні, ця робота вимагає висококваліфікованої команди, яка розуміє ризики, пов'язані з нею, щодо мінімізації відходів та забезпечення найвищого ступеню ефективності. Чим більш пружним або щільним є матеріал, тим складніше надати йому форму або видалити домішки. У такому випадку дробоструминна обробка може допомогти швидко і ефективно видалити грудочки і нерівності, згладжуючи будь-які проблеми, з якими менш інтенсивні методи не можуть впоратися.

З огляду на природу процесу, він зазвичай здійснюється за допомогою

цілого ряду машин - від промислових дробоструминних установок до ручних режимів і колісних машин - що дозволяє повністю контролювати процес дробоструминної обробки. Цей процес можна ще більше налаштувати, вибравши тип дробу, який відповідає кінцевій меті обробки матеріалу, що розглядається. З огляду на різноманітність практичних застосувань дробоструминної обробки, існує широкий спектр продуктів і пристроїв, які допомагають проводити дробоструминну обробку в малих і великих масштабах. Використання сучасного обладнання (рис. 2.4) дозволяє робітникам працювати за найвищими стандартами, гарантуючи, що якість отриманих поверхонь на деталях буде відповідати вимогам щодо їх експлуатації [13].



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд установки для дробоструминної обробки та завантаженням в неї залізних коліс [13]

Дробоструминна обробка має багато специфічних особливостей, полягає в тому, що на оброблюваний матеріал з високою швидкістю подається "дріб" або металеві частинки і фрагменти (рис. 2.5). Мікродріб при ударі

чинить вплив на поверхню, схожий на абразивний, видаляючи будь-які небажані домішки і допомагаючи зміцнити і належним чином підготувати метал до подальшого використання. Макродріб – металеві кульки 1...1,2 мм і більше призводять до поверхнево-пластичного деформування без зняття мікростружки.

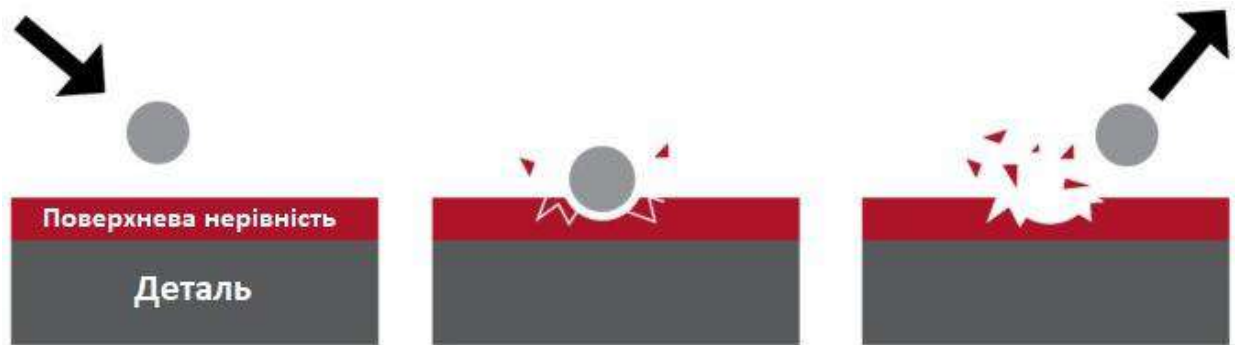


Рисунок 2.5 – Принцип роботи дробоструминної обробки

Дробоструминна обробка - це надміцний вид фінішної обробки, тому її зазвичай застосовують для міцних матеріалів. Зазвичай це алюміній, нержавіюча сталь, залізо, сталь, титан тощо. Вибравши тип дробу, оператор може контролювати вплив на обраний матеріал.

Вибір типу дробу є дуже важливим рішенням для процесу дробоструминної обробки. Розмір і твердість дробу визначають, наскільки сильно буде знята поверхня з матеріалу, що очищається. Тип матеріалу, що очищується, також відіграє певну роль в ефективності процесу обробки. Як правило, матеріал і розмір дробу вибираються залежно від складу матеріалу, поверхня якого обробляється.

Іншою важливою частиною процесу дробоструминної обробки є спосіб приведення в рух і результуюча швидкість матеріалу, що дробиться. Найпоширенішим способом приведення в рух дробоструминних матеріалів є використання відцентрового колеса. Для приведення в рух дробоструминного матеріалу його вивантажують у відцентрове колесо. Після того, як матеріал для дробоструминної обробки розігнаний колесом до потрібної швидкості, він

виштовхується з колеса і потрапляє в дробоструминну гармату. Потім оператор або машина, що тримає дробомет, спрямовує потік дроби для очищення поверхні матеріалу. Робочі тіла також можуть бути донесені в зону обробки струмом рідини (гідродробоструминна обробка) або повітря (пневмодробоструминна обробка), які подаються під тиском.

Існує широкий асортимент дроби (рис. 2.6), і вибір правильного дроби може допомогти гарантувати, що матеріал буде належним чином оброблений і повністю відповідатиме поставленим цілям.



Рисунок 2.6 – Сталевий «дріб», котрий застосовують при дробоструминній обробці [13]

Переважно дріб виготовляється зі сталі, що забезпечує високий ступінь відповідності та зносостійкості. Буває дріб скляний. Враховуючи той факт, що

існує широкий спектр матеріалів у настільки ж широкому діапазоні галузей, важливо переконатися, що обраний метод дробоструминної обробки є достатньо ефективним для досягнення мети - наприклад, зняття верхнього шару матеріалу з об'єкта - без заподіяння надмірної шкоди або утворення надмірних відходів.

Переваги дробоструминної обробки: доволі високоефективний процес, можливість зміцнювати поверхневий шар і більш інтенсивно обробляти обрані ділянки деталі, але є недоліки: наявність спеціального обладнання, бажано з ЧПК, нерівномірна обробка поверхонь, і можливість надзміцнити локальні місця деталі, визвати перенаклеп, що негативно позначиться на таких тонкостінних деталях, як лопатки, або навіть пошкодити тонкі крайки.

2.4 Піскоструминна обробка та її особливості

Піскоструминна обробка, яку також називають абразивоструминною обробкою, полягає в тому, що за допомогою тиску повітря дрібні абразивні частинки з високою швидкістю потрапляють на поверхню, щоб очистити її або змінити її текстуру. Раніше для цього процесу використовували пісок, але зараз існують й інші кращі матеріали для виконання цього завдання. Мета піскоструминної обробки залежить від типу проекту. Його можна використовувати для зняття існуючої фарби та іржі перед наступним фарбуванням або для видалення покриттів. З його допомогою можна видалити окалину зі сталі [14].

Піскоструминна обробка - це найефективніший спосіб очищення поверхонь і підготовки їх до нанесення нового шару фарби, епоксидної смоли або іншого покриття. Як найважливіший етап будь-якого проєктного процесу, піскоструминна обробка створює належну текстуру і видаляє поверхневі нерівності і бруд для отримання кінцевого продукту. Завдяки широкому

спектру матеріалів для піскоструминної обробки, її можна проводити на металі, пластику, дереві тощо. Для успішної обробки важливо використовувати правильне обладнання, матеріали та дотримуватися заходів безпеки [14].

Однією з головних причин використання піскоструминної обробки на противагу ручному поліруванню є її ефективність. При поліруванні вручну або за допомогою щіток очищення та підготовка поверхні може зайняти втричі більше часу. Піскоструминна обробка також є більш ретельною. Хоча шліфування вручну згладжує поверхню, якість кінцевого результату значною мірою залежить від сили людини та її уважності до деталей [14].

Піскоструминна обробка може також бути гідро- або пневмоструминною. Наприклад, обладнання прямого тиску використовує резервуар під тиском для подачі абразивного матеріалу. Висувний або дозуючий клапан на резервуарі під тиском відкривається, щоб випустити повітря або рідину під тиском і абразивний матеріал в піскоструминний шланг. Абразивний матеріал під тиском рухається по шлангу до камери високого тиску та піскоструминного пістолета. Пневматичний різновид обладнання показано на рисунку 2.7.

Абразивні матеріали досить дешеві й іноді придатні для багаторазового використання, що робить їх подвійно економічно вигідними. Деякі матеріали коштують дорожче, ніж інші, але навіть у цьому випадку їхня вартість може бути компенсована, якщо піскоструминна обробка скорочує витрати праці та часу.

Матеріал, що використовується для піскоструминної обробки, залежить від проєкту, оскільки, незважаючи на свою назву, піскоструминна обробка використовувала пісок в якості робочого середовища тільки на початку. Після використання в піскоструминній обробці пісок перетворюється на дрібний порошок, що унеможлиблює його повторне використання. Він також може викликати проблеми з диханням через вміст діоксиду кремнію, а також містить більше вологи і частинок, які можуть пошкодити обладнання. З цієї

причини використання піску в піскоструминній обробці застаріло [14].

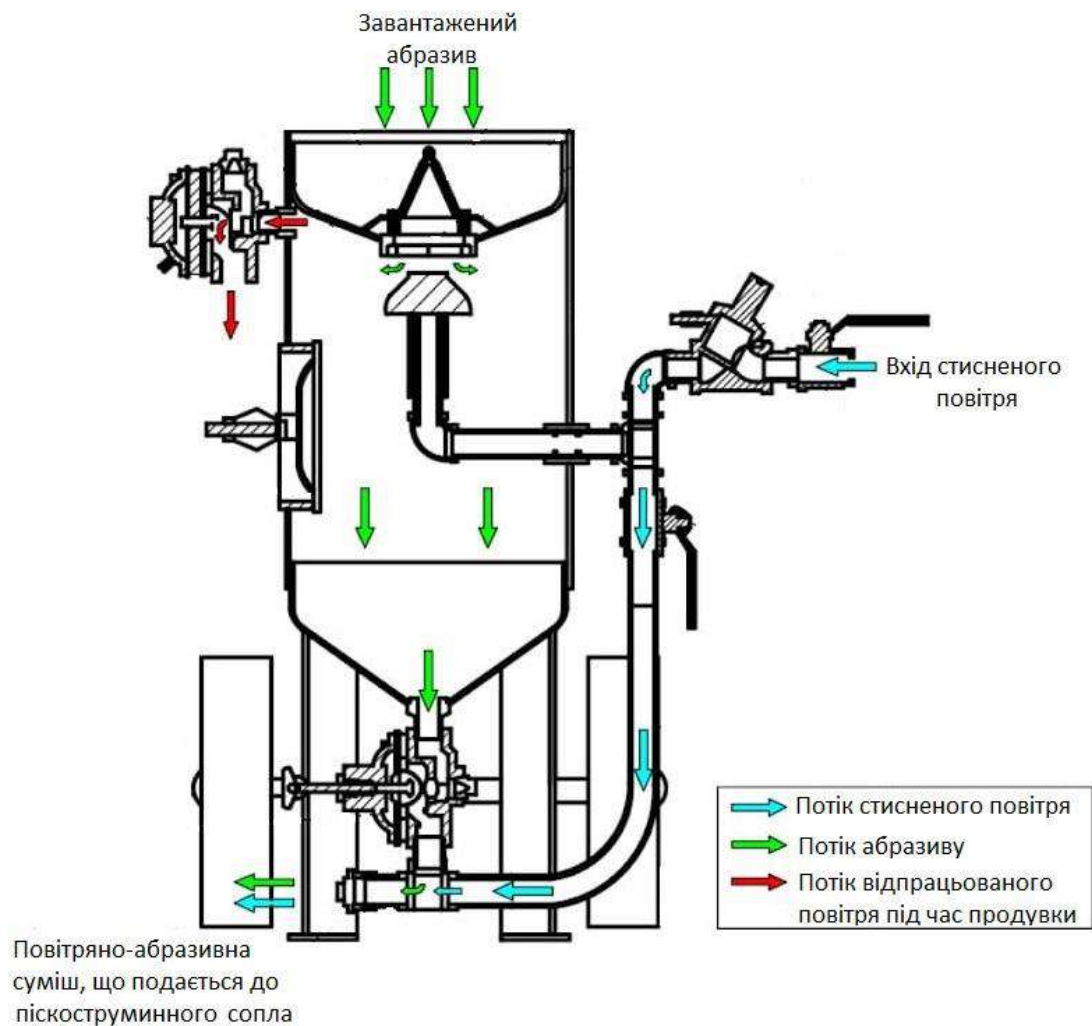


Рисунок 2.7 – Схема роботи пневмо-піскоструминного обладнання [13]

Хоча існує захисне обладнання, яке слід використовувати незалежно від робочого середовища, зараз існують більш ефективні матеріали, ніж пісок. Кожен з них має свою сферу застосування – деякі з них краще підходять для дерева, інші – для скла, а треті – для металів. Далі наведемо деякі з них.

Скляні мікрокульки бувають різних розмірів. Вони найкраще підходять для видалення фарби, іржі та нагару з металевих поверхонь. Вони також чудово підходять для полірування, очищення та для підготовки до фарбування та покриття.

Вугільний шлак іноді називають "чорною красунею". Його часто використовують в автомобільній промисловості через його грубу текстуру та

ефективність у видаленні іржі та фарби. Вугільний шлак – один з найдешевших видів робочого середовища. На відміну від піску, він не утримує вологу і легко відмивається.

Оксид алюмінію має найшвидший час мікрорізання серед усіх матеріалів, що використовуються в піскоструминній обробці. Він придатний для багаторазового використання і утворює мінімум пилу. Найчастіше використовується для зняття фарби та очищення поверхонь. Оскільки його можна використовувати більше одного разу, це знижує витрати.

Шкарлупа волоського горіха м'якша, ніж деякі інші варіанти, її для тонкого полірування більш чутливих поверхонь, а також дерев'яних деталей.

Мелені кукурудзяні качани мають схоже застосування, як і шкаралупа волоських горіхів, і як ще один м'якший засіб, можуть використовуватися майже так само. Найкраще використовувати кукурудзяні качани для очищення таких поверхонь, як камінь і скло. Їх також часто використовують у ремеслах по дереву.

Пластикова крихта - один з найбільш універсальних видів піскоструминних матеріалів. Вона буває різних форм і розмірів, а це означає, що її можна використовувати в різних проєктах. Пластикова крихта чудово підходить для обробки скловолокна, а як більш твердий матеріал ідеально підходить для металевих деталей.

Завдяки своїй довговічності, сталева дріб і крихта найкраще підходить для обробки металевих деталей. Існує багато різновидів на вибір, і їх можна використовувати для підготовки сталевих поверхонь, видаляючи іржу та фарбу, а також залишаючи гладку поверхню для нанесення таких покриттів, як епоксидна смола.

Карбід силікону - найтвердіший матеріал для піскоструминної обробки. Він випускається в декількох різних розмірах, і тому може використовуватися в різних проєктах, особливо якщо проєкт вимагає більш жорсткого абразиву. Карбід кремнію особливо корисний для полірування граніту та інших видів твердого каменю.

Ставроліт виготовляється з метаморфічної гірської породи і є слабшим типом абразиву. Тому його найкраще використовувати для зняття тонких шарів іржі, окалини та фарби, на більш товстих шарах він може не спрацювати. Це ще один варіант, який утворює дуже мало пилу [13].

Переваги: піскоструминний метод обробки простий, ефективний і економічний, що економить час порівняно із шліфуванням; використовується для обробки складних геометричних ділянок; доволі потужний.

Недоліки: нерівномірність обробки, інтенсивне ерозійне зношення сопла, залишає пил, що може забруднити повітря і утруднити дихання оператора, є пожежонебезпечним. Використання діоксиду кремнію може призводити до кремнієвої небезпеки через утворення дрібного пилу. Є ризик заподіяння шкоди від відскоків абразивного матеріалу. Обладнання може бути занадто дорогавартісним і неекономічним для невеликих проєктів. Потребує максимальних заходів обережності від операторів.

2.5 Обробка в псевдозрідженому абразиві

Обробка в псевдозрідженому абразиві (ПЗА) - це відносно новий розроблений нетрадиційний процес фінішно-оздоблювальної обробки, що використовує гідродинаміку псевдозрідженого шару для фінішної обробки. Псевдозріджений шар утворюється, коли шар твердих абразивних частинок рухається під потоком, схожим до рідини таким чином, що частинки поводяться як рідина. Завдяки рідиноподібній поведінці, в роботі [15] було продемонстровано можливість досягнення фінішної обробки як зовнішніх, так і внутрішніх поверхонь.

Фундаментальна установка ПЗА показана на рисунку 2.8 а,б. Вона складається з колони псевдозрідженого шару в основі, та абразивних частинок, що переміщуються повітряним потоком через колону, при цьому заготовка

утримується у фіксованому положенні всередині псевдозрідженого шару. Коли швидкість потоку збільшується, і в абразивному шарі утворюються бульбашки повітря, абразивні частинки виштовхуються і б'ються об поверхню заготовки. Абразивне середовище використовує транспортні властивості стиснутого повітря, зрідженого середовища і, таким чином, здатне досягати складних і важкодоступних ділянок. Удар абразивних ріжучих кромek призводить до виникнення на поверхні заготовки нормальних і тангенціальних сил, що спричиняють вдавнення і мікрорізання відповідно. Повторне врізання призводить до поліпшення шорсткості поверхні як на зовнішній, так і на внутрішній поверхні.

В роботі [16] для обробки одного з дисків ГТД у псевдозрідженому шарі абразиву використовують установку, що застосовується в серійному виробництві на підприємстві ПАТ "Мотор Січ" (рис. 1.10, б). Робоче середовище – стандартне шліфувальне зерно електрокорундової групи (ГОСТ 3647-80) зернистістю 32...80. Тиск стисненого повітря в камері 4...18 кПа нагнітається за допомогою компресора 10. Тиск перед соплами від 0,15 МПа до 0,18 МПа. Глибина занурення диска в псевдо-киплячий шар 0,25...0,5 діаметра деталі. При певній швидкості потоку повітря сили гідродинамічного тиску врівноважують масу абразивних частинок, їхній шар стає в'язким і текучим, набуваючи властивостей киплячої рідини; при цьому частинки абразиву здійснюють у шарі хаотичний турбулентний рух, що забезпечує інтенсивне переміщення абразиву та його оновлення в зоні обробки.

Для запобігання обробки ПЗА отворів до диска прикріплюються спеціальні захисні кільця 3. Час обробки 8 хв при реверсованому (по 90 с в один бік) обертанні диска зі швидкістю 18...23 м/с.

Диск 2 з попередньо прикріпленими кільцями 3 встановлюють в корпус герметичної камери 1, базуючи по отвору маточини, і закріплюють в затискному пристрої 4 на валу, обертання якого забезпечують електродвигун 8 і редуктор 7. Камеру герметично закривають екраном 6. Певний рівень псевдокиплячого шару абразиву регулюють кількістю абразивного зерна, що

засипається в бункер.

При необхідності можна лопатки встановити в такий лопатевий диск, в пази для хвостовиків, тоді диск буде називатись «ложний» диск, і оброблятись в шарі псевдозрідженого абразиву будуть пера лопаток. В цьому випадку обробляти теоретично можна увесь набір лопаток. Але такий варіант ПЗА – доволі агресивна абразивна обробка, і супроводжується інтенсивним шаржуванням поверхневого шару деталей абразивними частинками.

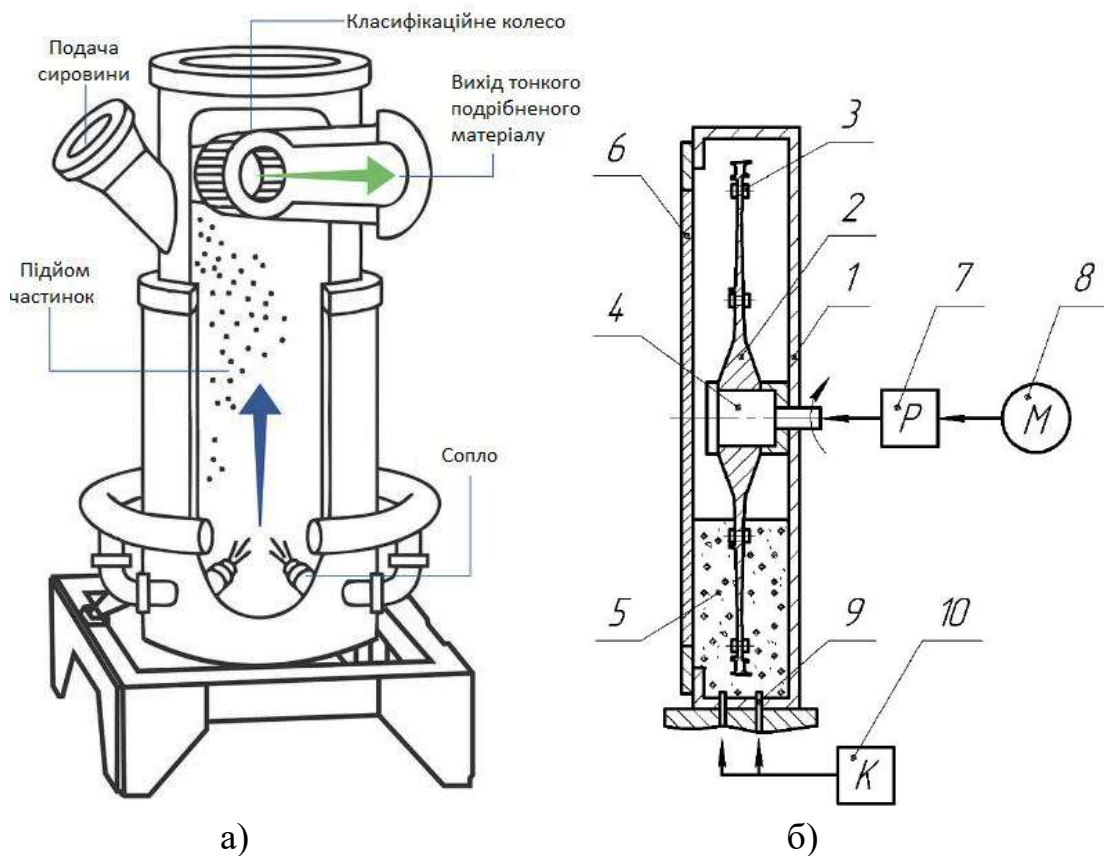


Рисунок 1.10 – Принципова схема установок: подрібнення абразиву (а) і зміцнення деталі типу диска (б) за допомогою ПЗА [16], [17]

Механізм зняття матеріалу: псевдозріджений шар прискорює абразивні частинки до високої швидкості і б'є по поверхні заготовки рандомно під різними кутами. Таким чином, механізм зняття матеріалу залежить від швидкості та кута, під яким абразивні частинки врізаються в поверхню. Як правило, для абразивних частинок, що вдаряються об поверхню з низькою

швидкістю та кутом, це призводить до скочування без значного зняття матеріалу. Більш швидкісні удари абразиву призводять до більш глибокого проникнення ріжучих кромek в поверхню деталі. На додаток до більш тривалої взаємодії з поверхнею заготовки, ці абразиви мають тенденцію ковзати по поверхні заготовки і знімати більше матеріалу. Крім того, як і в інших процесах на основі абразиву, властивості абразиву та заготовки також відіграють певну роль в ефективності фінішної обробки [15], [16], [17].

На режим псевдозрідження впливає швидкість потоку (тиск повітря), що подається в колонку псевдозрідження (рис. 2.9).

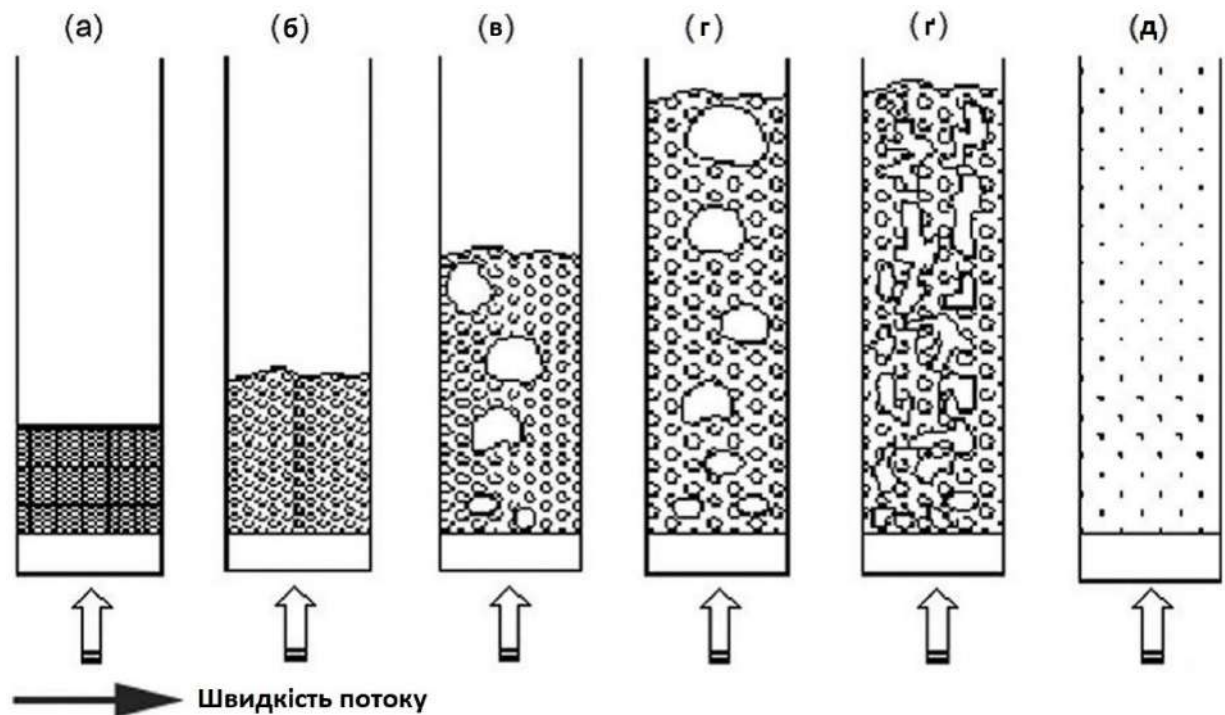


Рисунок 2.9 – Режими псевдозрідженого шару при різних швидкостях потоку: а) режим нерухомого шару; б) мінімальна псевдозрідженість; в) режим бурління шару; г) режим псевдозрідженого шару; г) режим турбулентного шару і д) режим пневматичного шару [15]

При мінімальному режимі псевдозрідження (рис. 2.9, б) вага абразивного наповнювача врівноважує гідродинамічний тиск, що чиниться швидкістю потоку, і абразивні часточки легко переходять з нерухомого шару

в бурхливий. При незначному збільшенні швидкості потоку абразивний шар досягає режиму бурління (рис. 2.9, в). У цьому режимі швидкість удару, як правило, дуже низька (набагато нижче 1 м/с). Зі збільшенням швидкості потоку бульбашки збільшуються в розмірах (рис. 2.9, г, г), поки абразивний наповнювач не досягне пневматичного шару (рис. 2.9, е), в якому бульбашки зникають. У пневматичному режимі швидкість удару часто перевищує 10 м/с, а іноді досягає 50 м/с. Висока ударна швидкість абразиву призводить до більшої швидкості зняття матеріалу та більшої глибини вдавнення, що призводить до інваріантної, але неточної обробки поверхні [15].

Для порівняння, низька ударна швидкість призводить до повільнішої зміни морфології поверхні, оскільки утворювані вм'ятини мають меншу глибину.

Метод ПЗА пропонує можливості тонкої фінішної обробки, оскільки внутрішні поверхні можуть бути оброблені до Ra 0,4 мкм і краще, незалежно від початкової морфології поверхні. На поточному етапі розвитку ця технологія має обмежене комерційне застосування.

Підсумовуючи, розглянемо переваги ПЗА. Має компактні розміри і високу виробничу потужність, ідеальне рішення для обмежених просторів та установок з меншою пропускною здатністю. Висока швидкість теплопередачі завдяки технології псевдозрідження, що забезпечує оточення кожної частинки повітрям. Матеріал обробляється інтенсивно, але нерівномірно.

Недоліки. Завдяки необхідності високого тиску повітря, вони не ефективні при обробці невеликих обсягів, що призводить до відсутності економії електроенергії. ПЗА потребує однорідної сировини. Потребує герметичності. Може спричиняти ерозійне зношення та утворення пилу, що потребує додаткових заходів контролю якості та повітря. Тонкостінні крайки будуть оброблятися набагато інтенсивніше інших поверхонь, поки будуть видалятися «строчки» є небезпека втратити точність тонких крайок через надмірне мікрорізання.

2.6 Особливості віброполірування

Численні дослідження [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24] показали, що цілісність поверхні лопаток має значний вплив на експлуатаційні характеристики і надійність цілісного вузла робочого колеса і лопаток під час роботи в суворих умовах, наприклад, при високій швидкості, високому тиску і високій температурі.

Висока шорсткість поверхні лопатки призводить до більш раннього мікроруйнування пограничного шару [18], збільшення коефіцієнта тертя [19], зниження ефективності теплопередачі [20] і загального тиску [21]. В роботі [22] стверджується, що гладкі лопатки забезпечують ККД турбіни 87,92%; у порівнянні з шорсткими лопатками, це покращення ККД на 2,5% дозволило знизити температуру на вході в турбіну на 32°K і підвищити довговічність турбіни. Результати досліджень Rolls-Royce Ltd показали, що ККД компресора збільшується з 89% до 94%, коли параметр шорсткості поверхні лопатки R_a зменшується з 0,5 мкм до 0,2 мкм, а точність обробки підвищується з 60 мкм до 12 мкм [23]. Як показано на рис. 2.10 [24], для заданої масової витрати, зниження ефективності ротора з шорстким покриттям лопаток є більшим, ніж у ротора з гладким покриттям. Більше того, різниця у погіршенні ефективності між роторами з шорстким і гладким покриттям зростає зі збільшенням швидкості випробувань.

У роботі [25] досліджено часовий вплив швидкості обертання чаші віброабразивної установки (рис. 2.11) на зміцнення, залишкові напруження і топографію поверхні на загартованому плоскому зразку із сталі AISI4140 з метою визначення оптимального часу обробки для модифікації поверхні. Крім того, досліджено, чи відбувається подрібнення зерна під час потокової обробки. Модифікована система Альмена використовується як ефективний метод для характеристики змін залишкових напружень і топографії поверхні під час потокової обробки. У той час як діапазони глибини залишкових

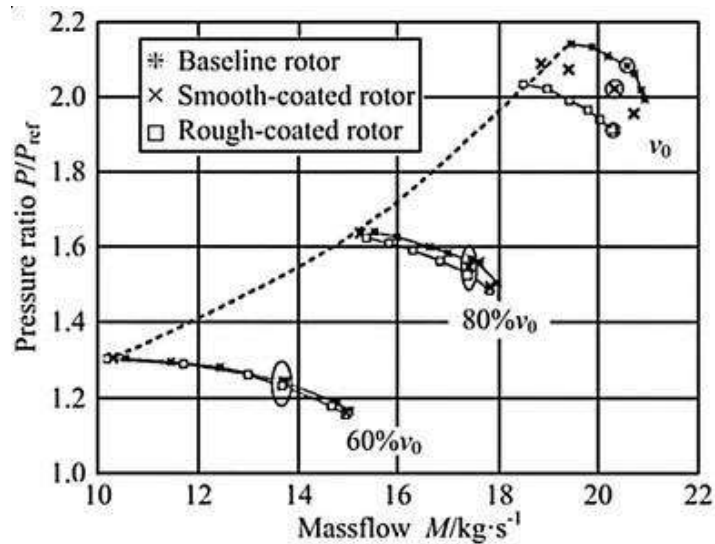


Рисунок 2.10 – Відношення тиску для роторів з різним покриттям при 60, 80 і 100% від номінальної швидкості [24]

напружень і зміцнення залежать від швидкості обертання чаші і часу обробки під час потокової обробки, залишкові напруження на поверхні залишаються інваріантними. Підвищення ефективності процесу може бути досягнуто за рахунок потокової обробки з використанням високої швидкості обертання, що забезпечує більшу глибину стискаючих залишкових напружень і зміцнення в приповерхневій області за менший час обробки.



Рисунок 2.11 – Машина для масової обробки Otec Präzisionsfinish GmbH [25]

В роботі [26] розглянуто можливість подвійного (додається вібрація закріпленої заготовки) віброполірування з використанням спеціального вібраційного пристосування на віброабразивній установці (рис. 2.12). Матеріали, що використовувалися для випробувань, включали суперполірувальне середовище у вібраційному жолобі (фінішний жолоб з робочою частотою і амплітудою коливань 25 Гц і 5 мм відповідно), водну лужну суміш і заготовки з Ti-6Al4V. Один з видів суперполірувального пластикового матеріалу завантажувався в жолоб разом з водою і лужною сумішшю, що використовувалася в якості мастила.

Основна мета дослідження полягала в тому, щоб з'ясувати, чи можна досягти необхідної якості поверхні за менший проміжок часу за допомогою вібрації не тільки середовища, але й деталі, якщо вібрація компонента відбувається за менший проміжок часу порівняно з механічним пристосуванням, в якому заготовка не вібрує. Час, необхідний для досягнення значення відсікання при використанні вібраційного пристосування в активному режимі, був на 75% швидшим, ніж у звичайному режимі.

Проведені експерименти в даній роботі [26] чітко вказують на те, що віброабразивна установка в активному режимі, себто разом з вібруючим пристосуванням, забезпечує більш швидку чистову обробку зразків порівняно з віброабразивною установкою в звичайному режимі. Це можна пояснити вищою відносною швидкістю і, отже, більшою силою удару між середовищем і титановими заготовками.

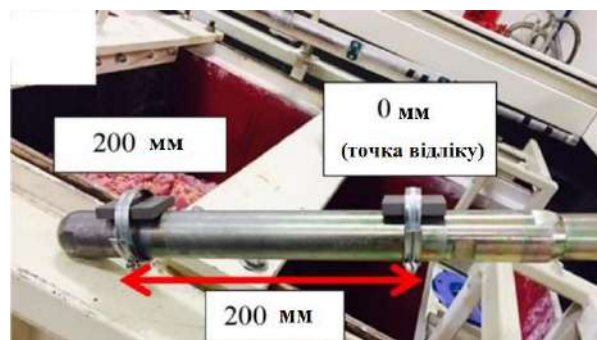


Рисунок 2.12 – Заготовки, закріплені на вібраційному пристосуванні [26]

Це було продемонстровано шляхом встановлення датчика сили на віброабразивній установці. Статистичний аналіз показав, що існує значна різниця в силі удару в режимі подвійного віброполірування в порівнянні зі звичайним. Таким чином, ефективність процесу вібраційної обробки може бути підвищена за рахунок скорочення часу циклу при використанні такого вібраційного пристосування. Це призведе до економії коштів, а також до меншого споживання енергії та ресурсів [26].

Віброабразивні процеси надають широкий спектр можливостей для фінішної обробки крайок і поверхонь виготовлених елементів. Обробка з використанням сипучого абразивного матеріалу знайшла своє застосування від простих процесів видалення задирок до складних процесів полірування розчинником або зміцнення поверхні заготовки. Віброабразивна техніка (рис. 2.13) може бути використана для обробки різних матеріалів, від пластмас, сплавів кольорових металів до сталевих деталей. На сьогоднішній день складна форма заготовки та її розміри визначають лише вибір відповідного обладнання та абразивного матеріалу. Постійний прогрес у вдосконаленні різних типів абразивних матеріалів і допоміжних хімічних сполук є причиною безперервної оптимізації процесу та його параметризації.



Рисунок 2.13 – Вібраційна установка для видалення задирок:
модель VBS(B) [27]

Одним з факторів, що впливають на зміну якісних і кількісних параметрів зразків при вібраційній обробці, є вибір абразивного матеріалу відповідної форми і відповідних абразивних параметрів (агресивності). Вибір абразивного матеріалу також має великий вплив на час обробки. При виборі відповідних параметрів обробки часто проводять попередні (дослідні) випробування з метою попередньої оцінки впливу обраних параметрів вібраційної обробки на отримані показники якості оброблюваного матеріалу. Оскільки на очікувану якість віброабразивної обробки впливає цілий ряд змінних, попередні випробування часто проводять багаторазово.

Процес відбувається в закритих ємностях, що містять фінішні компоненти, робоче середовище у вигляді відповідно підбраного абразивного або полірувального матеріалу та робочу рідину (рис. 2.14). Процес передбачає рух заготовки відносно абразивного середовища. Планетарні та вібраційні рухи спричиняють постійний рух абразивного матеріалу та заготовок, які вільно розміщені в робочому контейнері верстата.



Рисунок 2.14 – Віброабразивна обробка деталей в вібраційній установці VBS(B), з керамічним наповнювачем [27]

Це призводить до взаємодії матеріалів, що містяться в ємності, і

стирання поверхні [28]. Кожного разу перед застосуванням віброабразивної обробки необхідно провести правильний підбір параметрів процесу: абразивного матеріалу (шліфувального, полірувального або металевого), змашувально-охолоджувальних технологічних середовищ (ЗОТС) або паст, часу процесу, частоти роботи пристрою, відповідного співвідношення середовища і заготовок. Час обробки варіюється від декількох хвилин (м'які матеріали, легкі метали) до декількох тижнів (дорогоцінне каміння) і залежить від використовуваного методу, абразивного середовища і типу заготовок. Процес можна використовувати з сухими абразивними пастами і відповідним носієм (подрібнені кукурудзяні качани або шкаралупа волоського горіха).

На рисунку 2.15 показані різні види носіїв-сумішей. Сталеві абразивні матеріали, які використовуються для полірування деталей з металу та металевих сплавів. А також здатні видаляти задирки з пластикових і керамічних деталей. Керамічні носії корисні для видалення важких і легких задирок. Вони є дуже ефективними для видалення важких задирок. Таким чином можна обробляти тверді метали, такі як сталь, титан тощо. Часто вони також корисні для видалення іржі з металевих деталей. Пластикові носії корисні для точного видалення задирок, очищення та полірування деталей. Ефективні зазвичай на деталях з м'яких металів, таких як алюміній і латунь. Органічні матеріали є властивими для легкого видалення задирок – шкурка волоського горіха або кокосова шкаралупа. Легке полірування деталей можна виконати за допомогою гранул кукурудзяних качанів і шкаралупи волоського горіха. Це також екологічний варіант і безпечний для навколишнього середовища, оскільки він біологічно розкладається.



а) сталеві абразивні матеріали;



б) керамічні носії;



в) пластикові носії;



г) органічні матеріали;

Рисунок 2.15 – Види носіїв-сумішей, які використовуються у вібраційних машинах для видалення задирок [27]

Дослідження [28] показують, що віброабразивна обробка є ефективним методом округлення кромки і видалення задирок, що утворюються після механічної обробки. Елементи віброабразивної обробки, виготовлені з м'якого матеріалу - алюмінію ПА38, через 240 хвилин не мають видимих задирок, подальша обробка збільшує округлення кромки. За результатами досліджень можна зробити висновок, що втрати маси відбуваються практично рівномірно, трохи інтенсивніше в перші 60 хвилин (рис. 2.16). Мікроскопічні спостереження також підтверджують, що найбільше зменшення розмірів задирок відбувається в перші 60 хвилин. Подальша обробка продовжує зменшувати розмір задирок і починає скругляти гострі кромки.

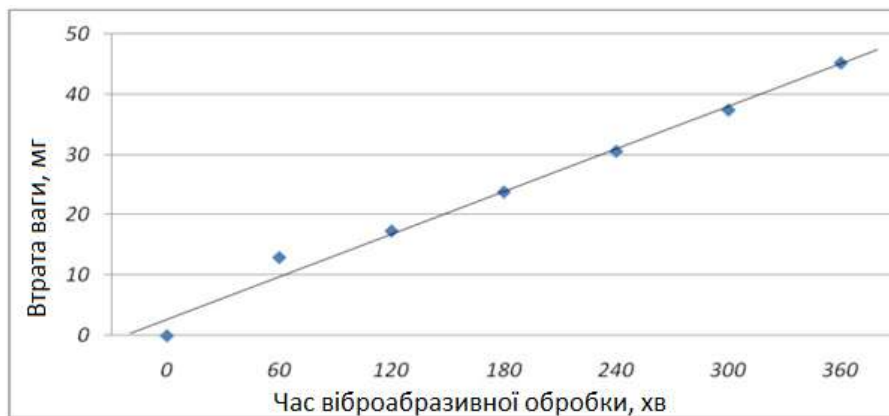


Рисунок 2.16 – Втрата ваги від часу вигладжування [28]

Аналіз впливу часу обробки на зменшення довжини задирок показує, що збільшення часу обробки призводить до зменшення довжини задирок. Подальше збільшення тривалості обробки зменшує вищезгадані розміри задирок, але з меншою інтенсивністю.

За результатами проведеного аналізу можна сказати, що віброабразивне полірування (ВАП) є достойною альтернативою ручному поліруванню лопаток компресора ВШФ, яка забезпечує - можливість обробки складного профілю аеродинамічних поверхонь пера при наявності тонких крайок; високу продуктивність і якість процесу.

3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Об'єкт дослідження

Дослідження впливу фінішної обробки на якість полірованих поверхонь (рис. 3.1, б) проводились на робочих лопатках 1 та 4 ступенів КВТ авіаційного двигуна Д-18Т з титанового сплаву ВТ8 (рис. 3.1,а). Хімічний склад титанового сплаву ВТ8 наведений в таблиці 3.1.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Досліджувані лопатки

Таблиця 3.1 – Хімічний склад титанового сплаву ВТ8 у % за ГОСТ 19807-91 [29]

Fe	C	Si	Mo	N	Ti	Al	Zr	O	H	Домішок
до 0,3	до 0,1	0,2 – 0,4	2,8 – 3,8	до 0,05	87,55 – 90,9	5,8 - 7	до 0,5	до 0,15	до 0,015	інших 0.3

3.2 Обладнання та оснастка для проведення досліджень

Фінішна обробка досліджуваних лопаток буде проводитись вручну на полірувальній бабці – верстаку полірувальному ТМ-2 (базова технологія) і в автоматичному режимі за допомогою віброабразивних установок.

Як інструмент для ручного абразивного полірування будуть використовуватись послідовно шліфувальні круги з електрокорундом білим 25А на вулканітовій зв'язці; розмір кругів $80 \times 10 \times 32$ і $100 \times 20 \times 20$, і зернистість, відповідно, F80 та F180.

Для віброабразивної обробки використовували установку Rösler R220 EC з різними наповнювачами: OFGS/S 09/09, RMB/D1 04/05ZS, RMB/D1 10/15S.

3.3 Методи дослідження

Дослідження виконували частково на обладнанні ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес», частково на базі НУ «Запорізька політехніка».

Лопатки піддавалися фінішній обробці (рис. 3.2) після фрезерування профілю пера. Для віброабразивної обробки додатковий припуск був відсутній, для ручного полірування він становив 0,5 мм. Перед і після виконання фінішної обробки для всіх лопаток було виміряно розміри пера, в перерізах профілю і контактних поверхнях хвостовика.

Лопатки у віброабразивних установках оброблялись без закріплення і без захисту поверхонь хвостовика. Фінішну обробку проводили до наведення досяжної шорсткості поверхні характерної для досліджуваного методу.

Контроль стану поверхонь.

Візуальний контроль стану поверхонь здійснювався на мікроскопі МБС-

10. Спостерігали якість поверхні, наявність поверхневих дефектів – ризок, залишків «строчок».

Контроль шорсткості.

Вимірювання параметрів шорсткості поверхні пера проводилося до і після виконання фінішної обробки лопаток за допомогою профілографа-профілометра 170311 та прибору SURFCOM TOUCH 50. Вимірювання шорсткості поверхні проводили в поперечному перерізі лопаток (де через особливості розташування «строчок» шорсткість більша) тричі, після цього розраховували середнє значення.

Визначення ступеню наклепу.

Ступінь наклепу оцінювали на поверхні за результатами вимірювання мікротвердості поверхневого шару «косого» шліфа за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 за навантаження 1 Н.

Вимірювання залишкових напружень.

Залишкові напруження, що виникли в поверхневому шарі під час фінішного оброблення, досліджували на установці ПОН-2 на зразках розміром $30 \times 6 \times 1,5$ мм, вирізаних із пера лопаток.

Експериментальні дослідження на опір втомі.

Дослідження втомної міцності лопаток проводили на електродинамічному стенді ВЕДС за кімнатної температури на базі 2 млн циклів. Момент руйнування фіксували за зниженням частоти власних коливань.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Фінішна обробка досліджуваних лопаток: (а) ручне полірування; (б) віброабразивна обробка

4 ПРОВЕДЕННЯ І ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Підготовка та проведення робіт

Дослідження проходили сім партій лопаток з титанового сплаву BT8, по три лопатки в кожній партії.

Перші три партії (№1, 2, 3) [30] оброблялись з незмінною технологією ВШФ на «Starrag SX051 В/С», та вдосконаленою фінішною технологією, яка все ж мала різною мірою часткове чорнове ручне полірування, чистову частину якого заміняло віброабразивне полірування для підвищення продуктивності.

Усі підготовлені лопатки були пронумеровані за порядком і пройшли такі операції основного ТП виготовлення після базового ВШФ, а саме:

Операція 150 – Розмітка. Розмітку виконували на 2,5 мм вище зазначеного в основному ТП розміру "h".

Операція 170 – Полірувальна. Обробка профілю пера за шаблонами.

Під час обробки партій № 1 і № 2 застосовували шліфувальні та паропластові круги згідно з основним ТП. Партію № 3 обробляли шліфувальним кругом із подальшим віброшліфуванням у круговій віброполірувальній установці R220 ЕС з абразивним наповнювачем марки RMB/D1 10/15S.

Параметри режиму обробки:

- маса абразивного наповнювача - в межах від 125 до 150 кг;
- частота обертання двигуна - 1500 об/хв;
- амплітуда коливання - в межах від 3 до 4 мм;
- час обробки - 5 год.

Операція 185 - Відпал

Операція 190 - Травлення

Замість операції 195 "Глянцювання" лопатки піддавалися віброполіруванню:

Партія № 1 оброблялась в круговій віброполірувальній установці R220 ЕС з абразивним наповнювачем марки RMB/D1 10/15S. Параметри режиму обробки:

- маса абразивного наповнювача - у межах від 125 до 150 кг;
- частота обертання двигуна - 1500 об/хв;
- амплітуда коливання - у межах від 3 до 4 мм;
- час оброблення - 1 год.

Партії №2 і №3 оброблялись в круговій віброполірувальній установці РВА 24 Turbo з абразивним наповнювачем із суміші марок РР 4G і РР 04/05 ZS. Параметри режиму обробки:

- маса абразивного наповнювача - в межах від 125 до 150 кг;
- частота обертання двигуна - 1500 об/хв;
- амплітуда коливання - в межах від 3 до 4 мм;
- час обробки - 1,5 год.

Частково результати досліджень експериментів партій №1,2,3 було взято з роботи [30]. Потім поміняли стратегію і почали зміни з ВШФ.

Партії №4, 5, 6, 7 оброблялись ВШФ на верстаті «Starrag SX051 В/С» без напівчистового етапа фрезерування з безприпускнуою технологією для ручного полірування, чистовий етап фрезерування якого відрізнявся подачею, яка формує «строчки»: $S=0,1; 0,15; 0,2; 0,3$ мм/об відповідно. Час чистового фрезерування склав, відповідно: 18, 14, 12, 9 хвилин.

Партію № 4 піддали віброполіруванню безпосередньо після виконання операції фрезерування, без попередньої підготовки поверхонь.

Партії № 5,6 для зменшення величини отриманих «строчок» на поверхнях профілю пера перед віброполіруванням було проведено легку ручну абразивну обробку фетровим накатним кругом 1 100×20×20. Для обробки партії № 5 на круг наочувався абразив зернистістю F120, а для партії № 6 – зернистістю F80.

Партія №7 мала «строчки», по величині порівняні з партіями №1-3 після ВШФ, тому її далі не досліджували.

Віброполірування лопаток партій № 4,5,6 виконували на круговій установці «Rösler» R220 EC до повного видалення слідів попередньої обробки. Частота обертання електродвигуна установки становила 1500 об/хв. Амплітуда коливання – від 3 до 4 мм.

Обробку ВАП лопаток партій № 4 та 6 виконували протягом 5 годин із застосуванням абразивного наповнювача марки OFGS/S 09/09.

Обробку ВАП лопаток партій № 5 виконували протягом 4 годин із застосуванням абразивного наповнювача марки RMB/D1 10/15 S.

Примітка - лопатки в установках обробляли без закріплення і без захисту поверхонь хвостовика.

В результаті маємо наступні партії лопаток:

№ 4 – фрезерування + ВАП 5 годин;

№ 5 - фрезерування + абразивна обробка F120 + ВАП 4 години;

№ 6 - фрезерування + абразивна обробка F80 + ВАП 5 годин;

№ 7 – не досліджували через нераціональні режими фрезерування.

4.2 Обробка результатів експериментів партій №1, 2, 3

Вимірювання C_1 , C_2 , $C_{\max}$, L у перерізах профілю пера і П хвостовика лопаток партій №1 і №3 після ручної абразивної обробки та після ВАП наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Розміри в перерізах вихідних і полірованих лопаток

Геометричні розміри профілю лопатки по технічним вимогам							
Розмір	Допуск на розмір	A_2-A_2	A_4-A_4	A_5-A_5	A_6-A_6	A_8-A_8	$A_{10}-A_{10}$
$C_{\max}$	-0,16	2,054	1,929	1,802	1,676	1,55	1,457
C_1	-0,12	1,591	1,495	1,397	1,298	1,20	1,130

C ₂	-0,12	0,871	0,819	0,766	0,712	0,65	0,620
L	±0,2	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
П	-0,04	6,4					

Продовження таблиці 4.1

Партія №1							
Після абразивної обробки							
1	2	3	4	5	6	7	8
Розмір	Відхилення	A ₂ -A ₂	A ₄ -A ₄	A ₅ -A ₅	A ₆ -A ₆	A ₈ -	A ₁₀ -
C _{max}		2,03	1,90	1,74	1,65	1,53	1,41
C ₁		1,49	1,39	1,28	1,25	1,17	1,10
C ₂		0,81	0,79	0,73	0,69	0,64	0,60
П	-0,03	6,37					
Після відпалу та віброполірування							
C _{max}		2,03	1,90	1,74	1,64	1,53	1,41
C ₁		1,48	1,37	1,27	1,23	1,16	1,09
C ₂		0,80	0,78	0,72	0,68	0,63	0,60
L		24,2	24,15	24,1	24,1	24,1	24,3
П	-0,03	6,37					
Партія №3							
Після абразивної обробки							
1	2	3	4	5	6	7	8
C _{max}		2,03	1,92	1,77	1,65	1,53	1,45
C ₁		1,57	1,48	1,38	1,3	1,2	1,1
C ₂		0,85	0,8	0,75	0,7	0,63	0,59
Після віброшліфування, відпалу та віброполірування							
C _{max}		2,02	1,91	1,76	1,61	1,5	1,42
C ₁		1,57	1,48	1,39	1,29	1,18	1,09
C ₂		0,85	0,8	0,76	0,71	0,63	0,58
L		24,2	24,15	24,15	24,2	24,2	24,2

Результати вимірювань параметрів шорсткості профілю пера лопаток партій №1 і №2 з боку "корита" і "спинки" після виконання віброполірування

представлено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Результати вимірювань параметрів шорсткості поверхонь профілю лопаток №1 і № 2 після віброполірування.

Елемент виміру	Партія №1		Партія №2	
	Суміш та (час виконання віброполірування, год)			
	RP 4G і RP 04/05 ZS (1,5)		RMB/D1 10/15S (1)	
	Межі шорсткості Ra, мкм	Клас Ra	Межі шорсткості Ra, мкм	Клас Ra
Зі сторони "спинки"	0,33...0,36	8	0,11...0,16	10
Зі сторони "корита"	0,17...0,25	9	0,13...0,17	10...9

Величина радіусів заокруглення кутів по висоті профілю становила для партії №1 - 0,3 мм, для партії №2 - у межах від 0,1 до 0,2 мм і для партії №3 - 0,6 мм.

На рис. 4.1 представлено зовнішній вигляд поверхні профілю пера лопатки з партії № 1 після віброполірування.

На поверхнях профілю пера і в радіусах переходу до хвостовика лопаток партій № 2 і № 3 під час збільшення спостерігається наявність слідів попередньої обробки.

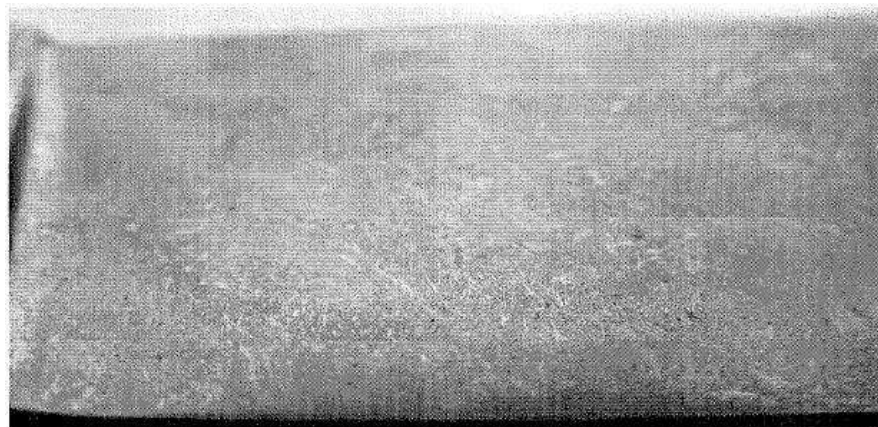


Рисунок 4.1 - Зовнішній вигляд поверхні профілю пера лопатки з партії № 1 після віброполірування

Максимальна товщина шару, що знімається, за профілем лопатки, виготовленої титанового сплаву, під час оброблення впродовж 1...1,5 год в абразивному наповнювачі RMB/D1 10/15S становить у межах від 0,01 до 0,03 мм. Потоншення хорди (розмір L) при цьому становить до 0,1 мм. Негативного впливу віброабразивної обробки на розмір П контактних поверхонь хвостовика лопаток не встановлено.

Візуальний контроль оброблених поверхонь усіма методами виявив, що після ручного полірування спостерігались мікродефекти у вигляді рисок (рис. 4.2, а), які можуть призводити до утворення втомних мікротріщин. Після віброабразивної обробки мікродефектів на обробленій поверхні не виявлено, поверхня мала розвинений мікрорельєф (рис. 4.2, б).



а)



б)

Рисунок 4.2 – Поверхня лопаток після ручного полірування (а) і віброабразивного полірування (б) партія № 3

4.3 Обробка результатів експериментів партій № 4, 5, 6

Перед виконанням віброполірування на всіх лопатках було виміряно параметри C_1 , C_2 , $C_{\max}$, хорди L у перерізах профілю пера лопаток методом 3D сканування. Аналогічний вимір було проведено після виконання віброполірування досліджуваних лопаток. Отримані результати з основних перерізів профілю пера лопаток представлені в таблицях А.1 - А.3 додатка А. Обробка лопаток за всіма досліджуваними варіантами забезпечує розміри за робочим кресленням.

Лопатки після фрезерування мали «строчки» – специфічний рельєфу на поверхні профілю пера, створюваного фрезою, у вигляді поперечних, і паралельних між собою канавок, розташованих один від одного на відстані рівній величині подачі фрези (рис. 4.3)



Рисунок 4.3 – зовнішній вигляд пера лопатки після фрезерування з подачею $S = 0,2$ мм/об (партія №6) перед фінішною обробкою

Візуальний огляд лопаток партії №4 не виявив на оброблених поверхнях профілю лопатки слідів «строчок» фрезерування (рис 4.4).

Візуальний огляд лопаток партії №5 показав, що на оброблених поверхнях профілю є сліди абразивної обробки у вигляді подряпин, що

досягають у довжину до 2-3 мм. Вони в основному розташовуються за «коритом» в районі вихідної кромки. (рис 4.5).

Огляд партії №6 показав, що на поверхнях пера, також за «коритом», в районі вихідної кромки, є множинні сліди абразивної обробки, але з більшою довжиною і густотою, що досягають у довжину до 5 мм (рис 4.6).



Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд пера лопатки (партія №4) після ВАП 5 годин



Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд пера лопатки (партія №5) після абразивної обробки F120 та ВАП 4 години



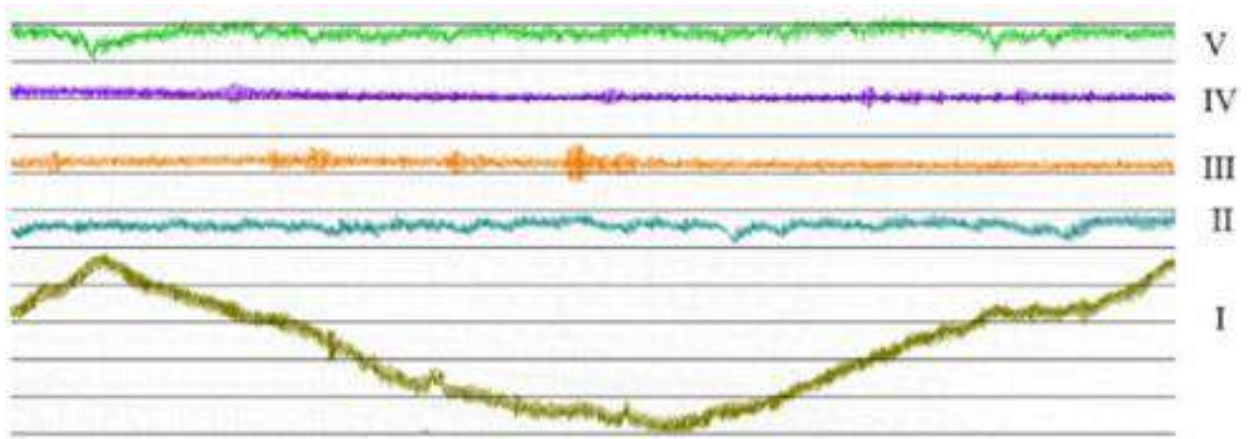
Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд пера лопатки (партія №6) після абразивної обробки F80 та ВАП 5 годин

Тому партія №3 показує розвинену поверхню з відсутністю абразивних подряпин.

Шорсткість лопаток партій № 4, 5, 6 склала R_a 0,27, 0,34 та 0,40 мкм відповідно, що забезпечує шорсткість, задану кресленням R_a 0,4 мкм.

4.4 Оцінка отриманих результатів

Віброабразивне полірування має можливість видаляти «строчки» і забезпечити високу якість поверхні лопаток. Результати вимірювання шорсткості поверхонь профілю лопаток до і після виконання фінішної обробки представлені у вигляді профілограм (рис. 4.7) по різних варіантах обробки. ВАП тривалістю 3...5 годин забезпечує необхідну шорсткість R_a 0,18...0,36 мкм.



I - після фрезерування; II - після 1,5 год ВАП; III - після 3 год ВАП;
IV - після 5 год ВАП; V - ручне полірування

Рисунок 4.7 – Профілограма обробленої поверхні лопаток

Окрім точності і якості також досліджували властивості поверхневого шару, які формує фінішна обробка, такі як наклеп (вимірюванням мікротвердості) і залишкові напруження.

Мікротвердість, виміряна на поверхні пера лопаток після віброабразивного полірування, незначно підвищилася з 2400 МПа до 2700...2900 МПа, відповідно ступінь поверхневого наклепу складає 12...20%. Глибина наклепаного шару збільшилась приблизно втричі з 0,015...0,02 мм до 0,04...0,06 мм.

До віброабразивного полірування на перерізі лопаток були зафіксовані залишкові напруження від -150 МПа до +70 МПа за глибини поширення 0,02...0,03 мм. Після віброабразивного полірування мали місце стискаючі напруження -300...-450 МПа, які зі збільшенням відстані від поверхні зменшуються поступово, при цьому глибина напруженого шару становила 0,06...0,08 мм. На рис. 4.8 для порівняння представлено графіки залишкових напружень зразків з досліджуваних лопаток після фінішної обробки різними варіантами: після ручного полірування і після ВАП. Максимальні залишкові напруження спостерігалися на поверхні лопаток, це пов'язано з тим, що за такого фінішного оброблення схема деформування поверхневого шару найбільше наближається до контактно-зсувної, за якої створюються умови для

формування залишкових напружень із максимумом на поверхні.

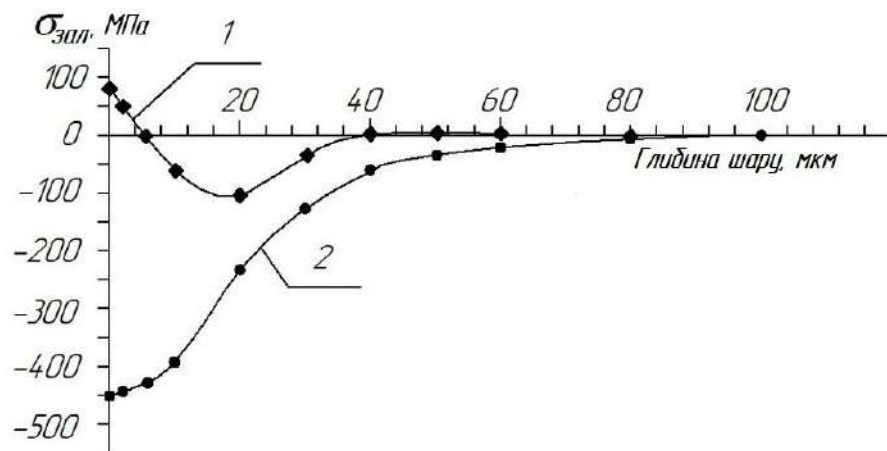


Рисунок 4.8 – Розподіл залишкових напружень лопаток після ручного полірування (1) і після віброабразивної обробки тривалістю 5 годин (2)

Основна мета вдосконалення ТП, окрім підвищення якості і продуктивності, є забезпечення такого експлуатаційного показника, особливо важливого для лопаток, а саме границя витривалості, яка характеризує опір втомі, через циклічні експлуатаційні навантаження лопаток.

Для підтвердження було проведено втомні дослідження по методиці п. 3.3. – на віброелектродинамічному стенді ВЕДС-400 на базі 100 млн циклів. Шість лопаток, оброблені ВАП, прокачали на встановленій незмінній границі витривалості $\sigma_{-1}=400$ МПа. Результати досліджень лопаток, показали, що ці лопатки (додаток Б, рис. Б.1) за характеристиками втомної міцності відповідають вимогам інструкції, яка нормує експлуатаційні властивості лопаток компресора, тобто всі витримали навантаження без руйнувань.

Попередні дослідження показали, що обробка ВАП значно підвищує цей показник порівняно з ручним поліруванням, але необхідно провести додаткові дослідження.

Ручне полірування супроводжується нестабільністю якості поверхні, часто з розтягувальними напруженнями, ризиками, що знижують опір

втомлюваності матеріалу і спричиняють значну дисперсію основних характеристик втомлюваності лопаток - границь витривалості та довговічності, особливо під час перевантажень. Основною причиною підвищення опору втомі досліджуваних лопаток унаслідок віброабразивного полірування є поліпшення основних параметрів поверхневого шару пера - шорсткості, наклепу і залишкових напружень. Зменшення шорсткості та усунення слідів "строчок" після фрезерування, технологічних концентраторів напружень, а також наведення стискаючих залишкових напружень підвищує несучу здатність лопаток за циклічних навантажень. Збільшення наклепу і напруженого шару (з стискаючими напруженнями) забезпечує збереженню вихідного рівня сприятливих стискаючих напружень у процесі тривалої експлуатації двигунів, що зі свого боку сприяє збереженню первісної витривалості оброблених віброабразивним поліруванням лопаток.

В цілому можна зробити висновок, що лопатки партії №4 (оптимальне ВШФ з $S = 0,1$ мм/об + ВАП 5 годин) показали найкращі результати по всіх дослідженнях, і, до того ж, скорочення трудомісткості ($t_{шт-к}$) в 6 разів і більше в залежності від обраного варіанту обробки, через те, що полірують лопатки вручну по черзі, а в віброабразивну установку завантажують весь набір лопаток, тобто цей час є перекриваємим. Економічний ефект (п.6) від впровадження цього варіанту фінішного етапу виготовлення лопаток компресора складає 3,48 млн грн.

4.5 Технологічні рекомендації

В результаті проведених досліджень можна рекомендувати для ТП виготовлення лопаток компресора наступні технологічні рекомендації:

- 1) Операція чистового фрезерування: оброблювальний центр з ЧПК «Starrag SX051 В/С» фреза $\varnothing 3,2$ мм, $t = 0,7$ мм; $S = 0,1$ мм/об ($S_{хв} = 1435$ мм/хв, $S_{зуб} \geq 0,045$ мм/зуб); $n = 7960$ об/хв; $V_p = 80$ м/хв, час виконання 18 хв, лопатки обробляються послідовно;
- 2) Операція віброабразивного полірування: установка «Rösler» R220 ЕС; частота обертання електродвигуна 1500 об/хв; амплітуда коливання – 3...4 мм; абразивний наповнювач марки OFGS/S 09/09 масою 125...150 кг; тривалість 5 годин; лопатки обробляються одночасно.

5 РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ

5.1 Вихідні дані

Для розрахунку на міцність було взято просту модель $100 \times 50 \times 7$ мм з конструктивним концентратором напружень, подібну до спрощеної моделі лопатки компресора ГТД. Як відомо з вищенаведених даних перед фінішно-оздоблювальною операцією на деталі залишаються періодично розташовані сліди, так звані «строчки», викликані різанням сферичної фрези, після ВШФ. Тому на змодельованій деталі (рис. 5.1) також було змодельовано періодичні «строчки» діаметром 0,3 мм, глибиною 0,15 мм.

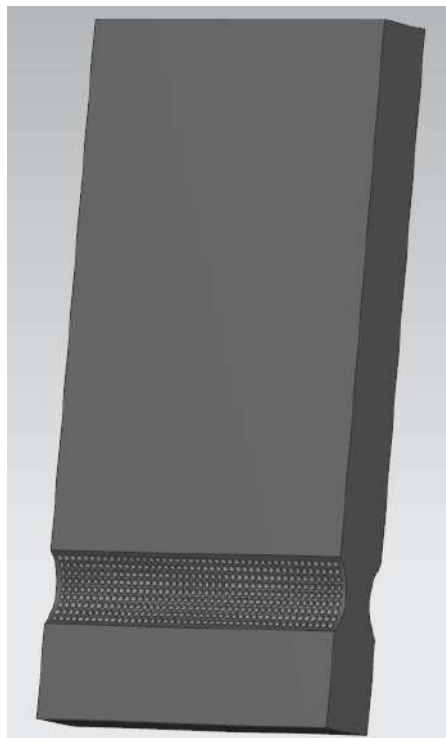


Рисунок 5.1 – Спрощена модель з «строчками»

Щоб змодельовати максимально приближені до реальних навантаження, до деталі було прикладено еквівалентні навантаження потоку повітря (на згин) в траку компресора двигуна плюс навантаження (на розтягання), еквівалентні відцентровим силам, що діють на лопатку та закріплення хвостовика.

5.2 Розрахунок на міцність

Для розрахунку деталі на міцність, її модель було, розбито вільною тетраедальною сіткою кінцевих елементів (FEM) (рис. 5.2), розмір одного елементу – 0,05 мм, після розбиття в деталі налічувалося 1913728 елементів.

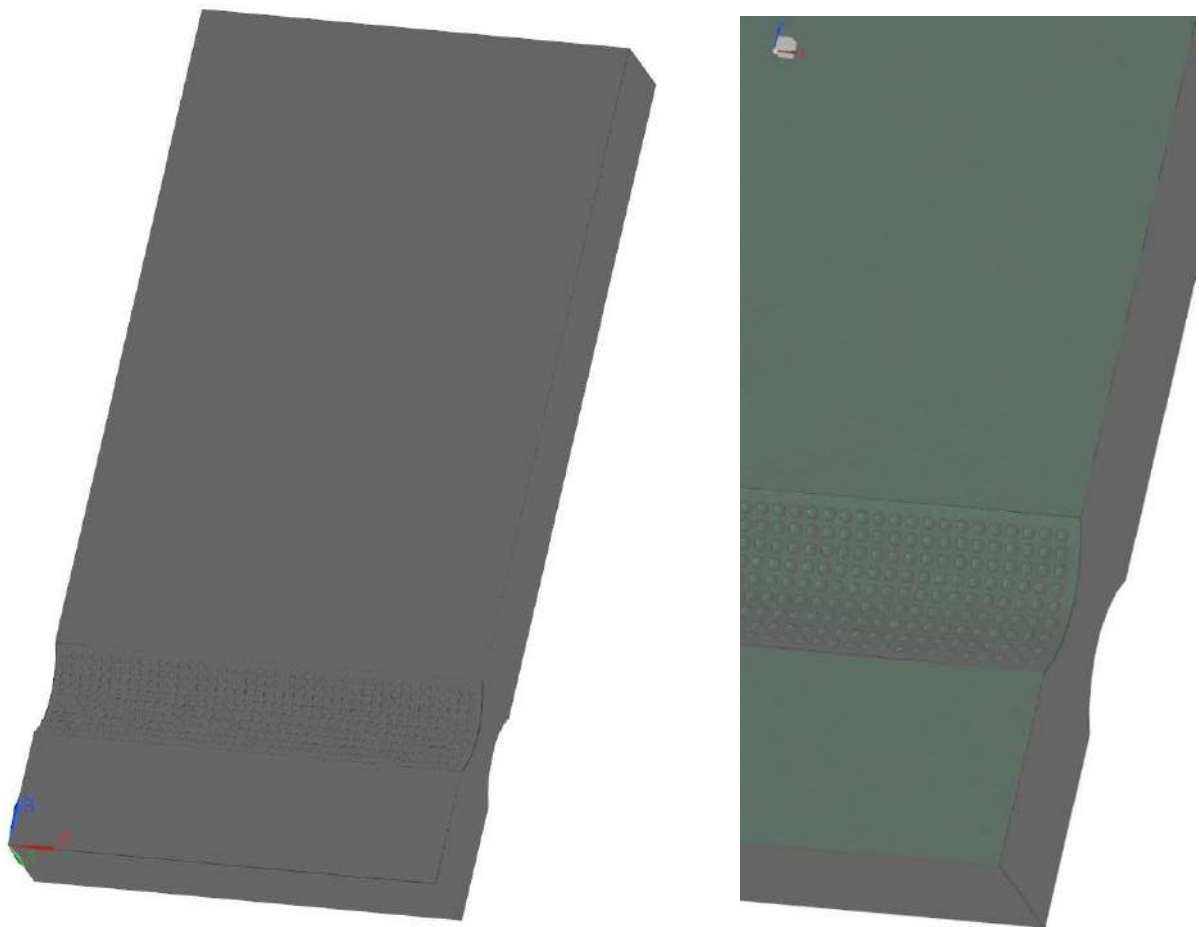


Рисунок 5.2 – Модель, яку розбито вільною тетраедальною сіткою FEM, з наближеним видом

Далі деталь було закріплено та навантажено згідно з даними з пункту 5.1 еквівалентними експлуатаційним навантаженнями (рис. 5.4, 5.5).

Задано характеристика матеріалу – титановий сплав BT8 (рис. 5.3).

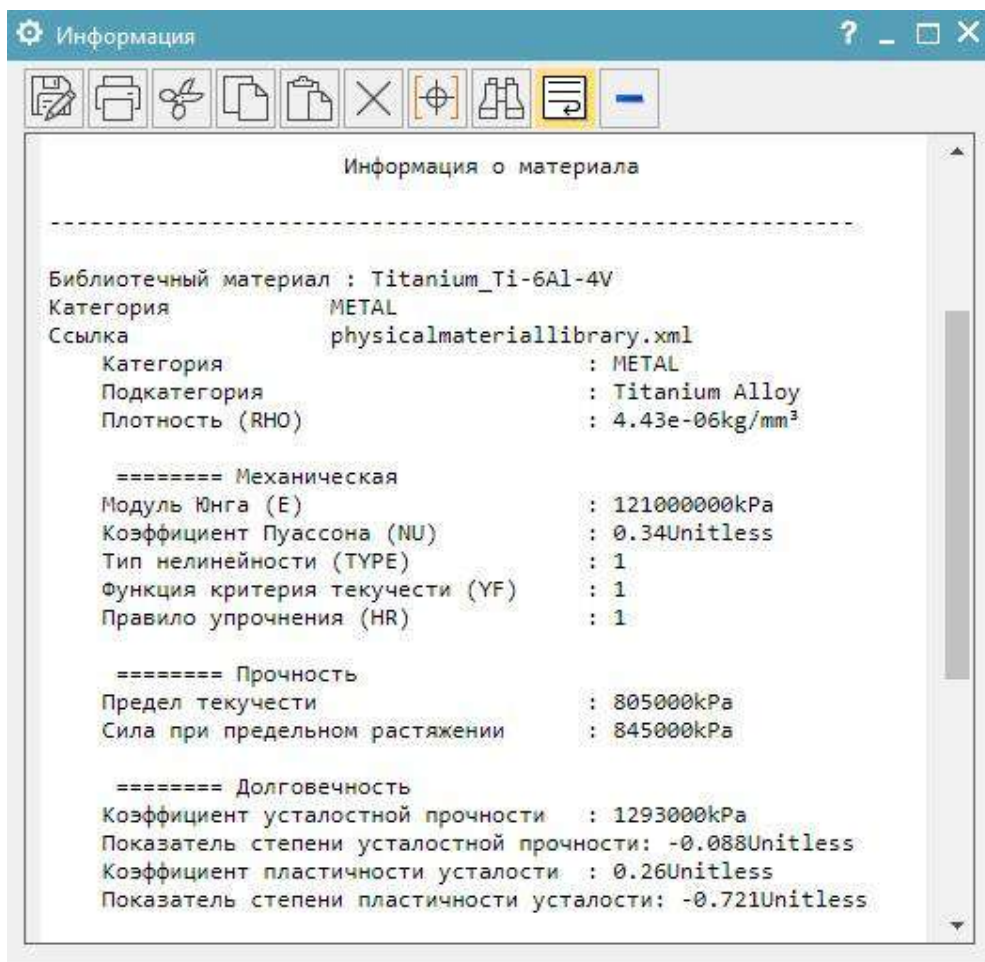


Рисунок 5.3 – Характеристики материалу BT8, заданого в програмному модулі Siemens NX



Рисунок 5.4 – Модель з відображенням зони закріплення

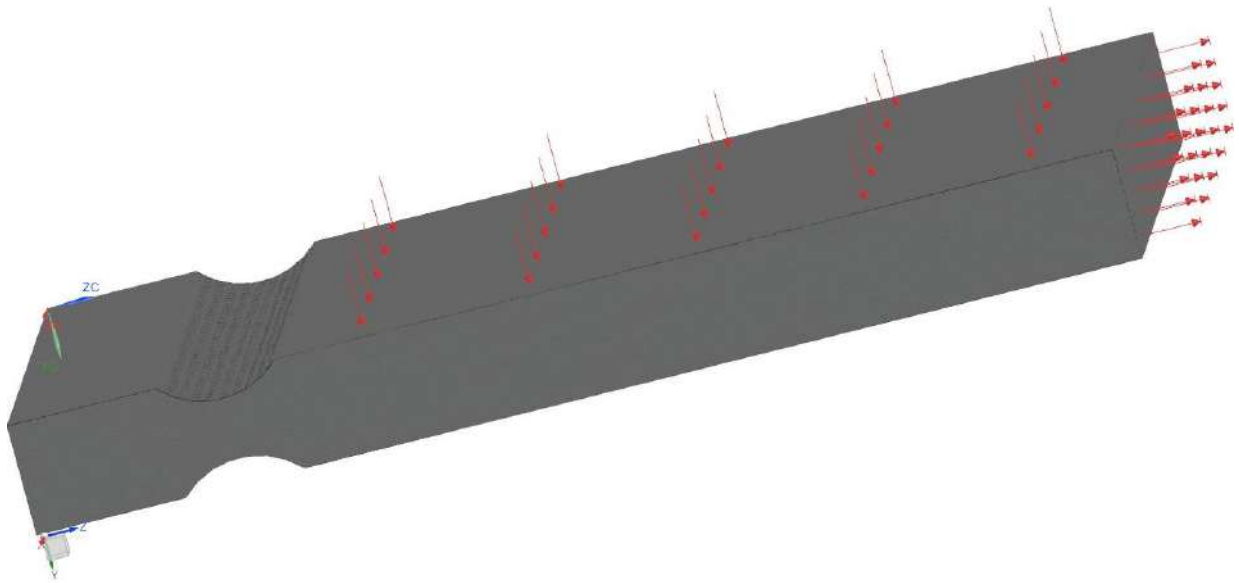


Рисунок 5.5 – Модель з розташуванням зон навантаження

Запускаємо на розрахунок перший експеримент. Отримуємо розрахунок еквівалентних напружень в моделі. Далі відображено (рис. 5.6-а, 5.6-б) результат розрахунку на міцність, напружено-деформований стан (НДС) після умовного ВШФ, який по собі лишив «строчки».

Небезпечний переріз очікувано знаходиться в концентраторі напружень, в зоні зі «строчками».

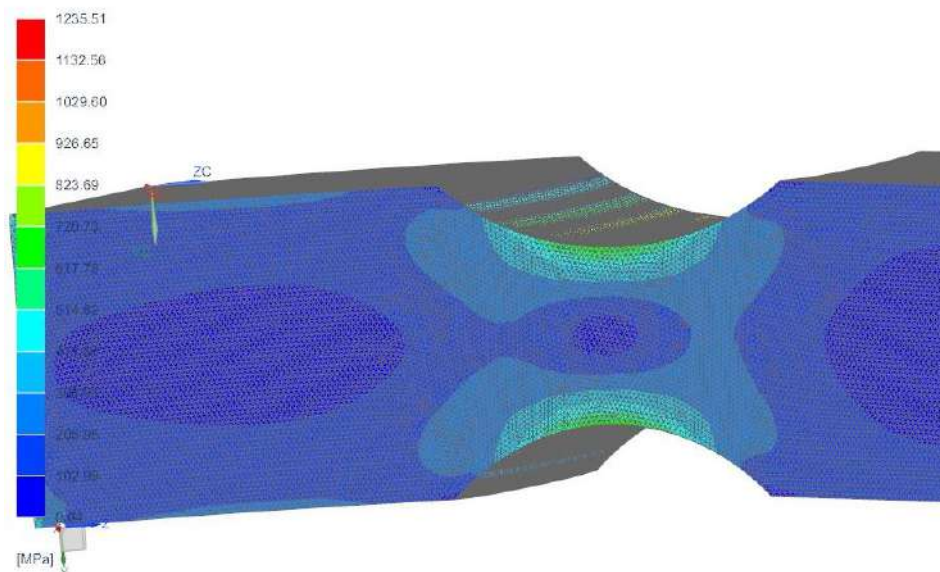
Далі після умовного ВШФ (**дослід 1**) було змодельовано ще три досліді: моделі деталі після 3 варіантів віброполірування:

дослід 2 – умовно, після ВАП з тривалістю обробки 1,5 год з умовною глибиною зняття матеріалу $t=0,05$ мм, глибина «строчок» 0,10 мм (рис. 5.7, 5.8, 5.9);

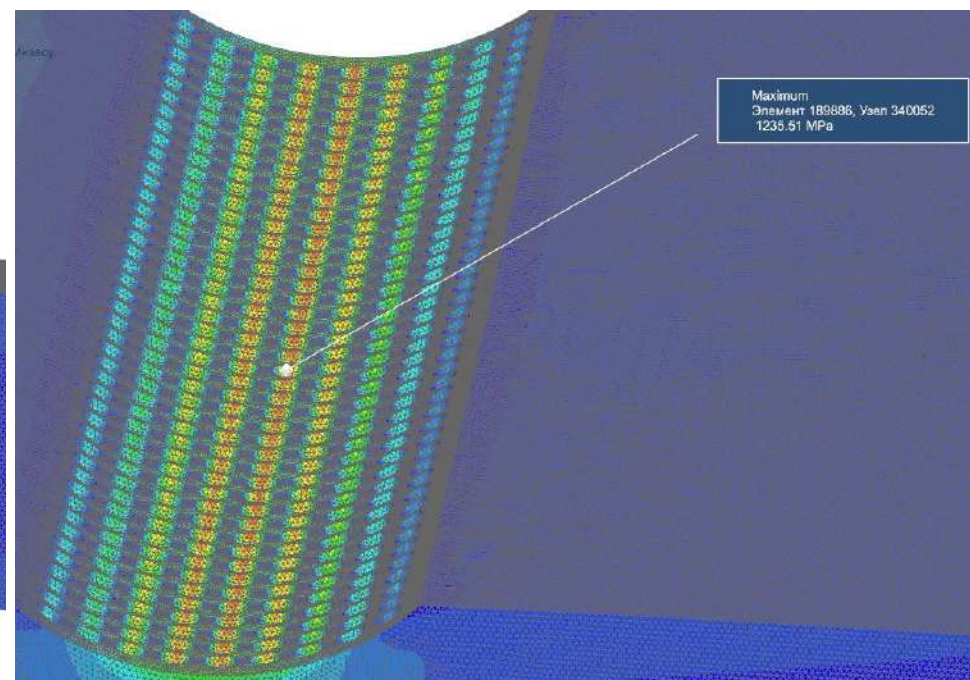
дослід 3 – умовно, після ВАП з тривалістю обробки 3 годин з умовною глибиною зняття матеріалу $t=0,10$ мм, глибина «строчок» 0,05 мм (рис. 5.10, 5.11, 5.12);

дослід 4 – умовно, після ВАП з тривалістю обробки 5 годин з умовною глибиною зняття матеріалу $t=0,16$ мм, «строчок» немає, їх видалено на глибину більшу, ніж радіус (рис. 5.13, 5.14, 5.15).

Isratka_golovina_sim1 : Solution 1 Результат
 Subcase : Static Loads 1, Статический шаг 1
 Напряжение - По элементам узлам, Неусредненный, По Мизесу
 Мин. : 0.04, Макс. : 1235.51, Единицы : МПа
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина



а)



б)

Рисунок 5.6 – НДС деталі після прикладених навантажень

Метою розрахунку є оцінка впливу наявності «строчок» на поверхні деталі і їх величини (бо із збільшенням часу обробки ВАП знімається верхній шар матеріалу, і глибина «строчок» поступово зменшується, поки вони повністю не зникають) на рівень напружень і розташування небезпечного перерізу.

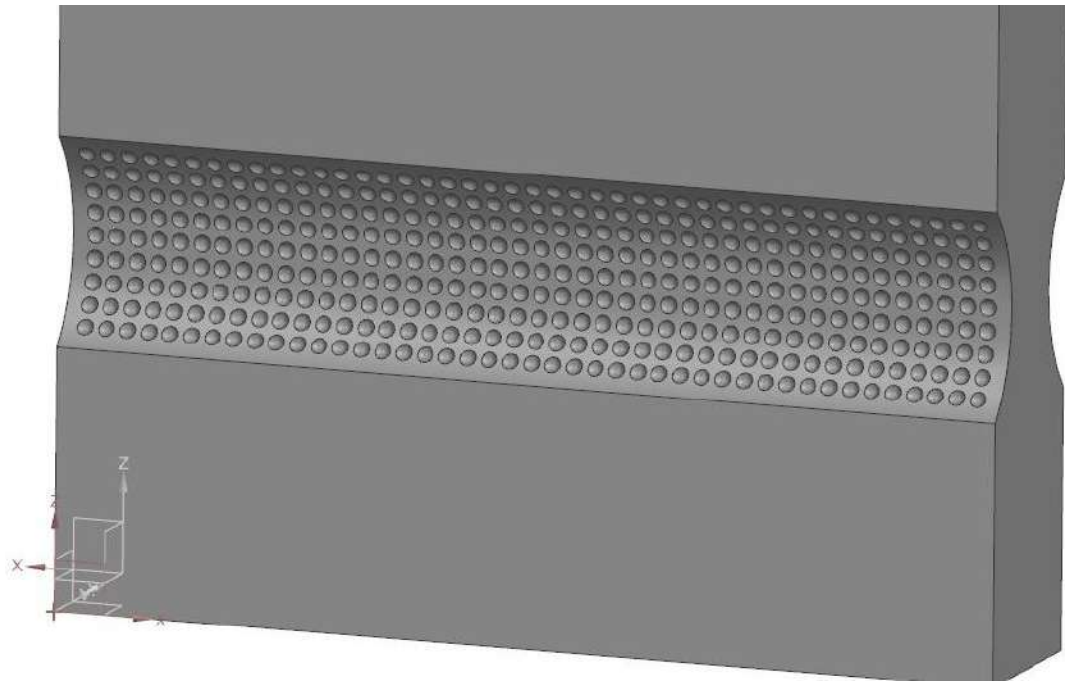


Рисунок 5.7 – Спрощена модель лопатки ГТД з так званими «строчками», що сумарно зменшилися в площі після умовного віброполірування – дослід 2

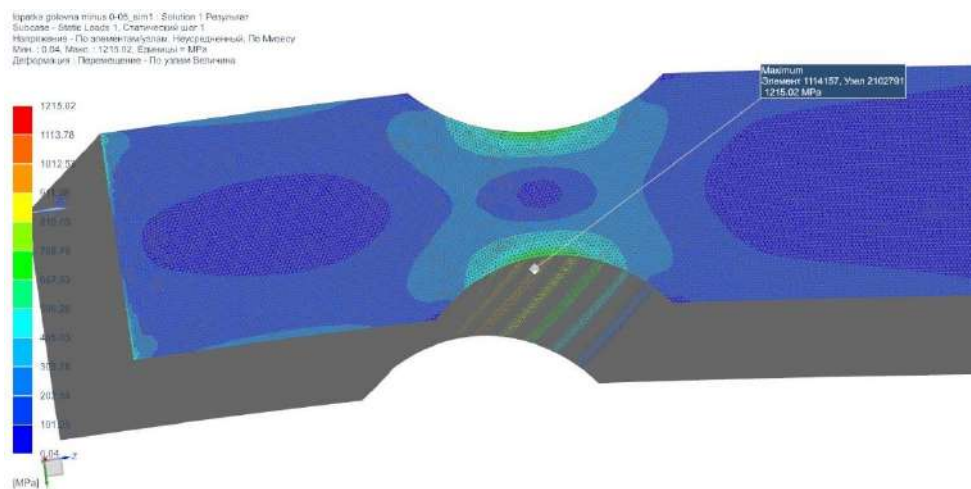


Рисунок 5.8 – НДС деталі після умовного віброполірування тривалістю 1,5 год та прикладених навантажень (дослід 2)

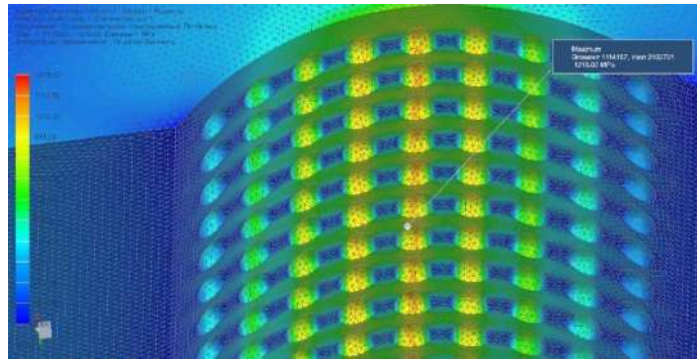


Рисунок 5.9 – НДС деталі (дослід 2) після умовного віброполірування тривалістю 1,5 год та прикладених навантажень (збільшений вид)

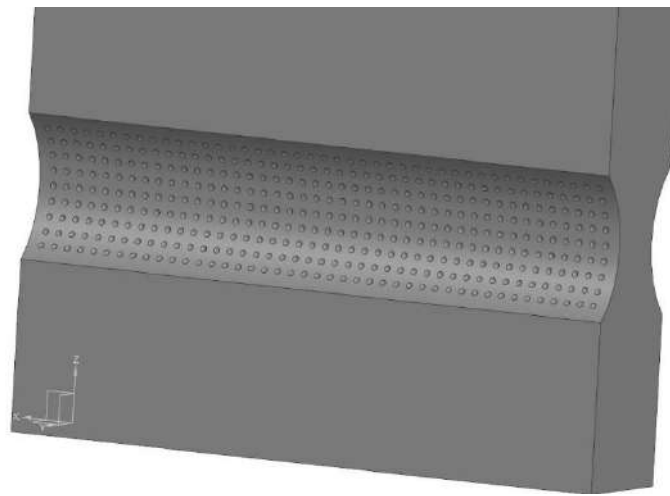


Рисунок 5.10 – Спрощена модель (дослід 3) з так званими «строчками», що зменшилися в площі після умовного віброполірування 3 год

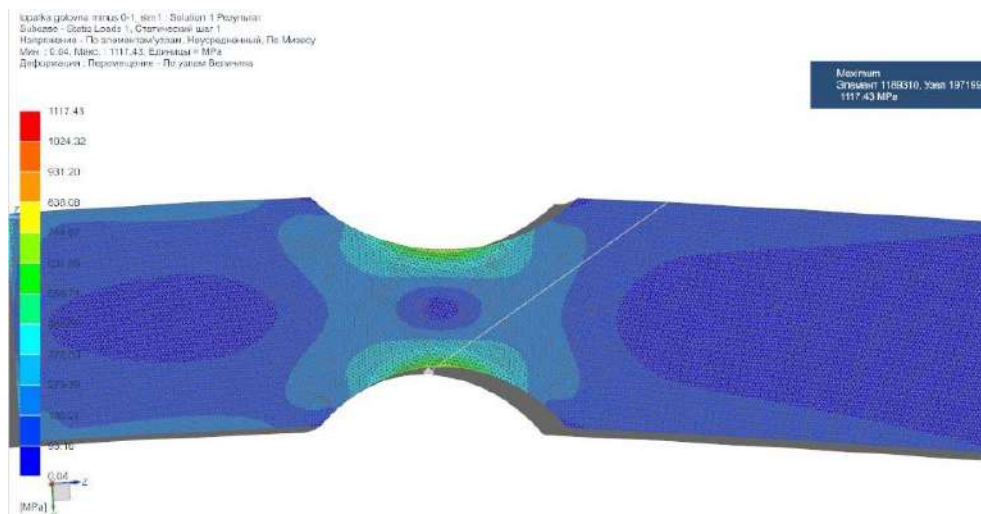


Рисунок 5.11 – НДС деталі після віброполірування тривалістю 3 год (дослід 3) та прикладених навантажень

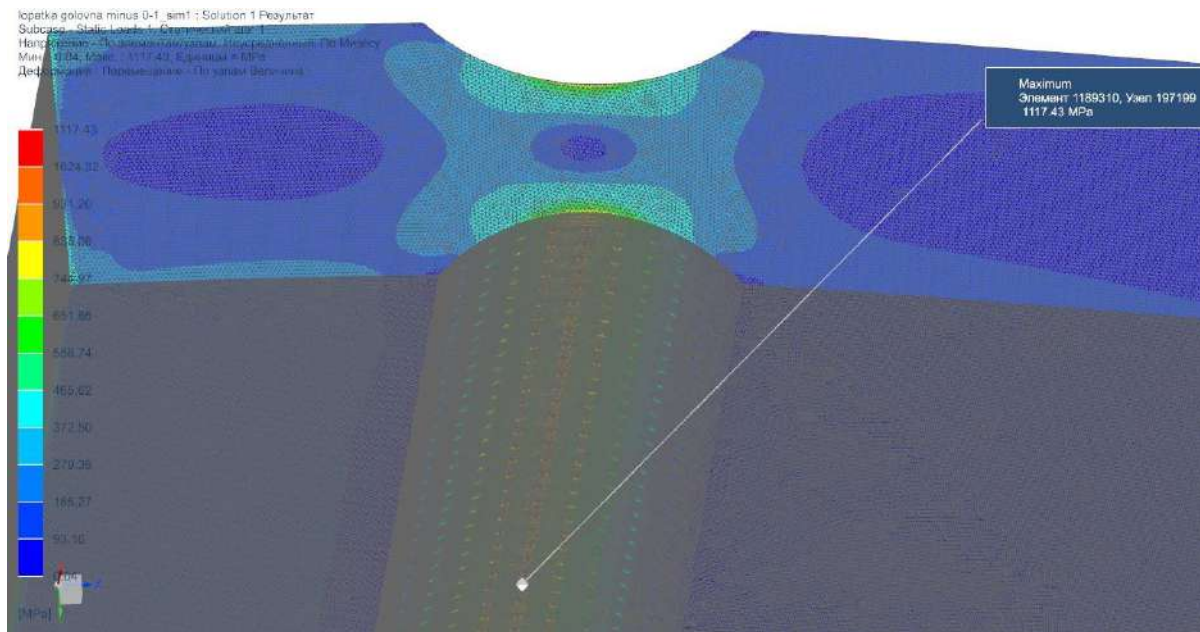


Рисунок 5.12 – НДС (дослід 3) після віброполірування тривалістю 3 год та прикладених навантажень (збільшений вид)

Після умовного віброполірування тривалістю 5 годин, так звані «строчки» зникли, та зменшилась товщина найтоншого місця спрощеної моделі лопатки (рис. 5.13, 5.14, 5.15).

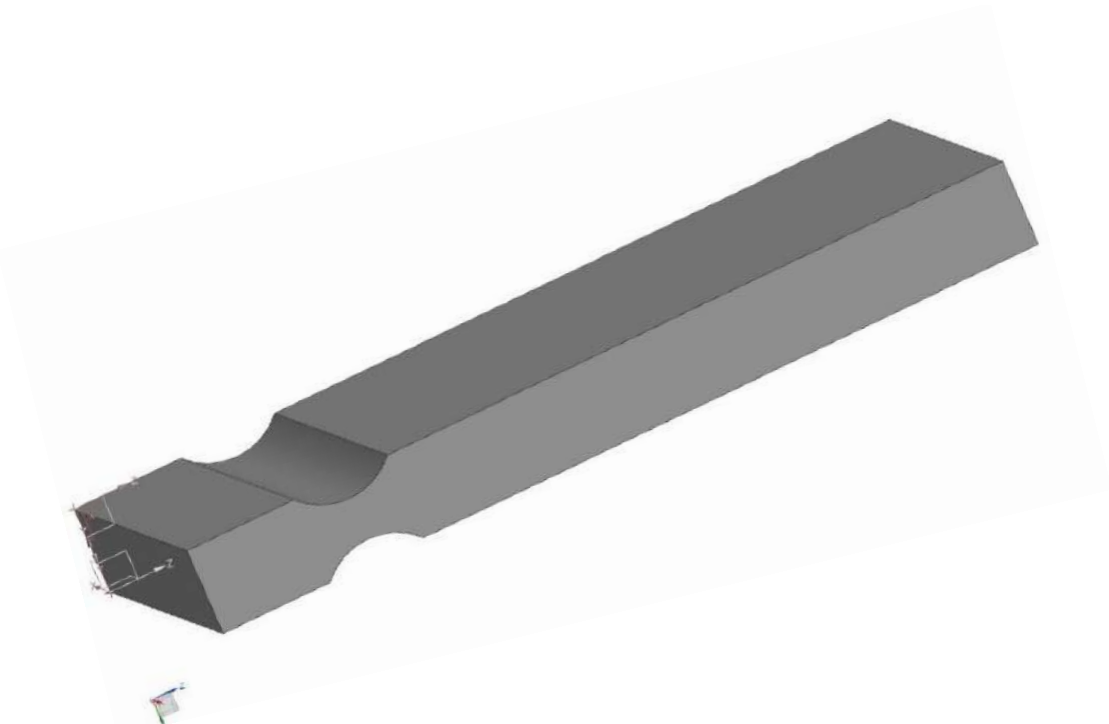


Рисунок 5.13 – Спрощена модель лопатки ГТД вже без «строчок», після умовного віброполірування з тривалістю обробки 5 год (дослід 4)

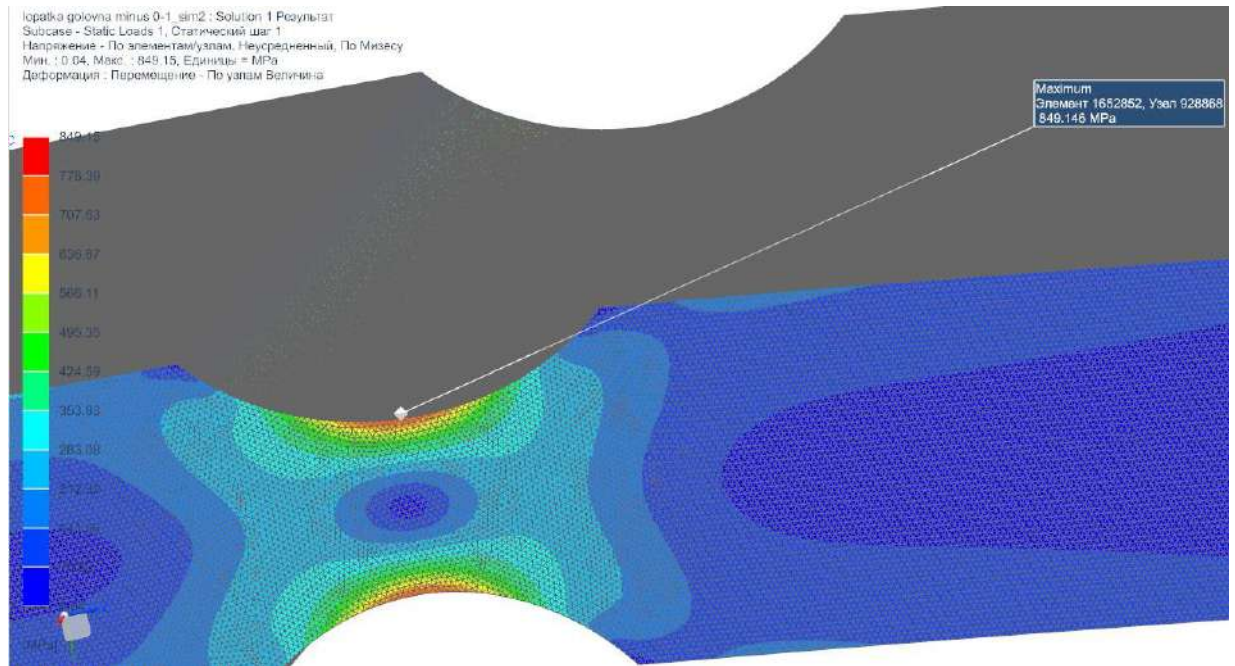


Рисунок 5.14 – НДС (дослід 4) після віброполірування тривалістю 5 год та прикладених навантажень

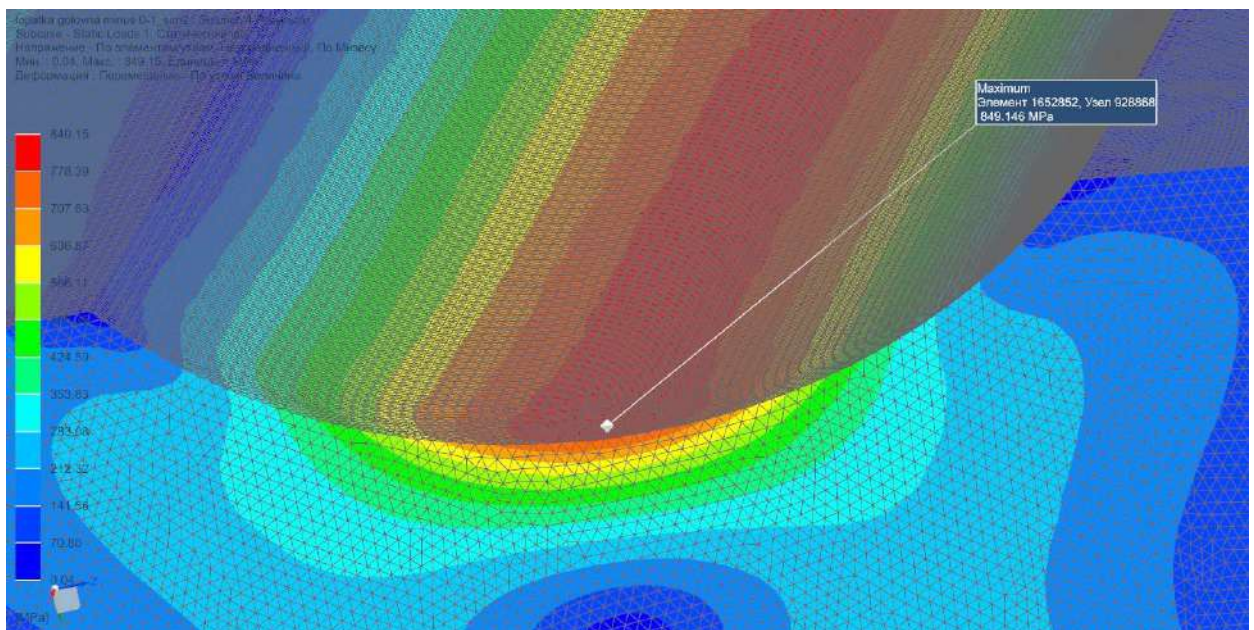


Рисунок 5.15 – НДС деталі після віброполірування тривалістю 5 год та прикладених навантажень (збільшений вид)

5.3 Результати розрахунку

В результаті попередніх розрахунків 4 дослідів були отримані наступні дані, а саме розташування небезпечного перерізу – в зоні «строчок» максимальні значення напружень $\sigma_{\max}$, на деталі після ВШФ, яке залишає по собі так звані «строчки», що умовно піддавалась віброполіруванню з різною тривалістю та різною глибиною t зняття матеріалу, відповідно (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Порівняльні значення розрахунків з різною тривалістю віброполірування після ВШФ

№	Тривалість віброполірування, год	Умовна глибина зняття матеріалу t , мм	Максимальне напруження $\sigma_{\max}$, МПа
1	0	0	1235,51
2	1,5	0,05	1215,02
3	3	0,10	1117,43
4	5	0,16	849,15

З результатів представлених в таблиці 5.1 можна зробити висновок, що коли при тривалішій обробці віброполіруванням «строчки» після ВШФ зникають повністю, знижується максимальне напруження в найуразливішій частині моделі, що показано на (рис.5.16).

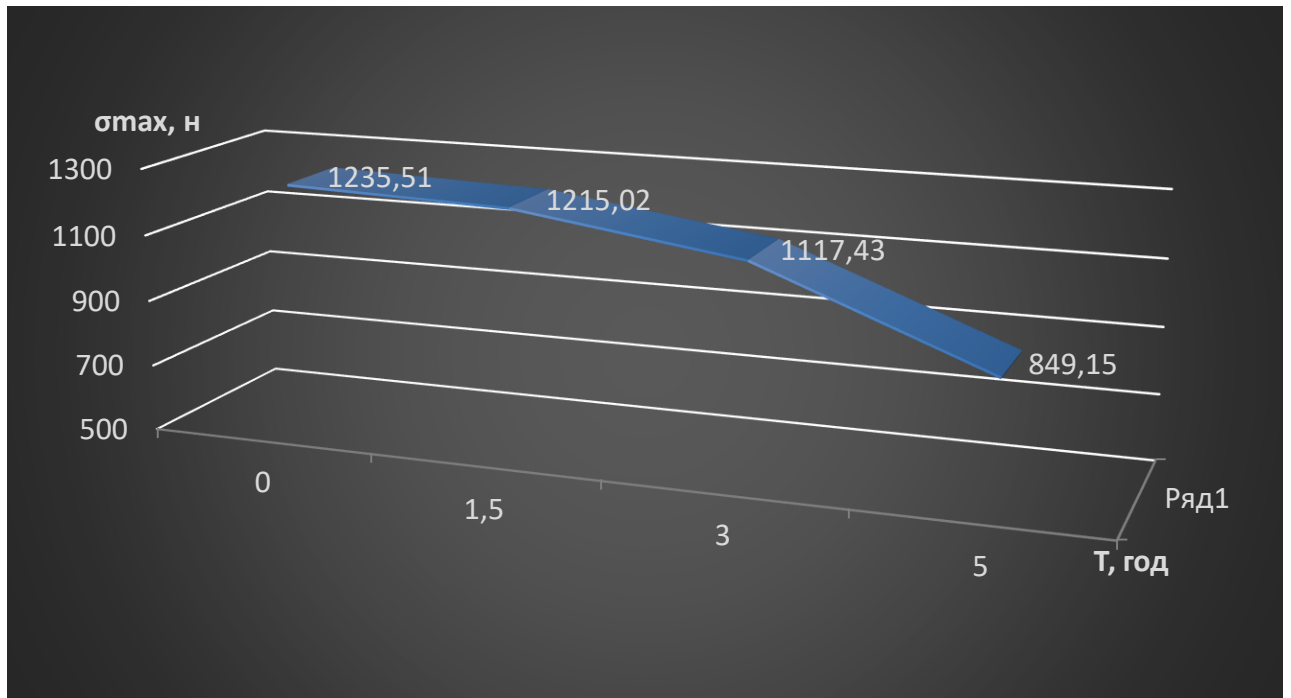


Рисунок 5.16 – Об’ємний графік залежності максимального напруження від тривалості процесу віброполірування

В цілому можна сказати, що напруження в небезпечному перерізі зменшуються на 30%, коли «строчки» повністю знімають.

6 ОЦІНКА ОЧІКУВАНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ

Мета розрахунку оцінки очікуваної економічної ефективності розробки у магістерському науково-дослідному проєкті "Забезпечення високої продуктивності фінішно-оздоблювальної обробки титанових лопаток ГТД" полягає в проведенні комплексного аналізу для обґрунтування впровадження віброабразивної обробки замість ручного полірування. Мета включає в себе визначення вартості робіт, порівняння трудовитрат, аналіз продуктивності та якості обробки. Далі, проводиться розрахунок економічної ефективності, оцінка ризиків та можливостей, щоб на основі отриманих даних зробити висновки та сформулювати рекомендації для поліпшення процесу обробки титанових лопаток ГТД. Основна мета полягає в об'єктивній оцінці переваг від переходу з ручної праці до автоматизованої віброабразивної обробки та визначенні оптимальних шляхів раціоналізації виробничих процесів.

Заробітна плата основних виробничих робітників, визначаю за формулою (6.1):

$$Z_o = \sum_{i=1}^{m_{оп}} t_{шт_i} \cdot C_{тар} \cdot K_6 \cdot k_{доп} \cdot k_{соц} \quad (6.1)$$

де $m_{оп}$ – кількість операцій у ТП (табл. 6.1);

$t_{шт-к_i}$ – норма штучно-калькуляційного часу виконання і-ої операції, год ТП (табл. 6.1);

$C_{тар}$ – годинна тарифна ставка робітника верстатника на і-ій операції, грн. [31, т.А.1, с.33];

K_6 – коефіцієнт, що враховує оплату основного робітника верстатника при багатоверстатному обслуговуванні [31, т.2.1, с.13];

$k_{доп}$ – коефіцієнт, що враховує додаткову заробітну плату [31, с.13];

$k_{соц}$ – коефіцієнт, що враховує страхові внески [31, с.13].

Амортизаційні відрахування на обладнання за формулою (6.2):

$$A_{\text{вир}} = \sum_{i=1}^{m_{\text{оп}}} \frac{K_i \cdot H_{ai} \cdot t_{oi}}{100 \cdot F_{\text{д}} \cdot 60} \quad (6.2)$$

де K_i – первісна вартість оснащення на i -ій операції, грн. (табл. 6.1);

H_{ai} – річна норма амортизаційних відрахувань на (оснащення) i -ої операції (табл. 6.1);

t_{oi} – основний час на i -ій операції, хв (табл. 6.1);

$F_{\text{д}}$ – дійсний фонд часу роботи устаткування, год.

Витрати на інструмент за формулою (6.3):

$$S_{\text{ін}} = \sum_{i=1}^{m_{\text{оп}}} \sum_{j=1}^{n_{\text{ін}}} \frac{C_{\text{ін}ij} \cdot t_{\text{шт}ij} \cdot \eta_{\text{м}}}{T_{ij} \cdot (n_j + 1)}, \quad (6.3)$$

де $C_{\text{ін}ij}$ – ціна інструменту j -го виду на i -ій операції, грн./шт.

$t_{\text{шт}i-kj}$ – штучно-калькуляційний час роботи j -го інструменту на i -ій операції, хв (табл. 6.1);

$\eta_{\text{м}}$ – коефіцієнт машинного часу;

T_{ij} – період стійкості інструменту j -го виду на i -ій операції, хв [31, т.3.8, с. 22];

$n_{\text{ін}}$ – номенклатура інструментів на i -ій операції [31, т.3.8, с.22];

n_j – число переточок інструменту j -го виду до повного зношування або кількість ріжучих граней інструменту [31, т.3.8, с.22].

Витрати на технологічну електроенергію за формулою (6.4):

$$S_{\text{е}} = \frac{N_{\text{в}} \cdot k_{\text{N}} \cdot k_{\text{ч}} \cdot k_{\text{од}} \cdot k_{\text{w}} \cdot t_{\text{штк}}}{\eta \cdot k_{\text{в}}} \cdot C_{\text{е}}, \quad (6.4)$$

де N_B – потужність головного електродвигуна, кВт (табл. 6.1);

k_N – середній коефіцієнт завантаження електродвигуна [31, с.16];

$k_{\text{ч}}$ – середній коефіцієнт завантаження електродвигуна за часом [31, с.16];

$k_{\text{од}}$ – середній коефіцієнт одночасної роботи всіх електродвигунів верстата [31, с.16];

k_w – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі заводу [31, с. 16];

Ц_ϵ – вартість 1 кВт·год електроенергії.

Витрати обслуговування та ремонт обладнання за формулою (6.5):

$$S_p = \frac{\text{Ц}_{\text{то}} \cdot K_p \cdot C_p}{N}, \quad (6.5)$$

де $\text{Ц}_{\text{то}}$ – залишкова вартість обладнання, грн.

K_p – коефіцієнт відрахувань до ремонтного фонду [31, с.16].

Витрати інші загальновиробничі за формулою (6.6):

$$I_H = Z_o \cdot k_{\text{заг}} \quad (6.6)$$

де $k_{\text{заг}}$ – коефіцієнт, що враховує інші загальновиробничі витрати [31, с.17].

Розрахункова кількість потреб в обладнанні за формулою (6.7):

$$C_p = \frac{t_{\text{шт-кі}} \cdot N}{F_d \cdot k_B \cdot k_3 \cdot 60} \quad (6.7)$$

де $t_{\text{шт}_i}$ – штучно-калькуляційний час і-тої, операції виготовлення деталі, хв;

N – програма випуску, шт.;

Таблиця 6.1 – Вихідні дані початкового та рекомендованого ТП

Вихідні параметри	Позначення	Технологічний процес	
		Початковий	Рекомендований
Річна програма випуску деталей, шт.	N	650	
Назва операції		Полірувальна	Віброабразивна
Обладнання		Верстак полірувальний ТМ-2	Rosler R220 EC
Штучно-калькуляційний час, хв.	T _{шт-к}	2160	210
Розряд верстатника		7	5
Розряд наладчика		-	-
Основний час, хв	T _{oi}	1056,6	112,5
Тарифна ставка основних робітників, грн/год	C _{тар.}	84,4	65,1
Число змін	m	2	2
Оптова ціна верстата, грн	F	7800	78300
Число оснащення, шт.		1	1
Термін обслуговування оснащення, років	n	2	15
Норма амортизаційних відрахувань, %	H _a	7,7	14,9
Потужність електродвигунів, кВт	N _{ел}	0,35	3

F_d – дійсний фонд часу роботи обладнання, год, [31, с.10];

k_v – коефіцієнт виконання норм часу [31, с.10];

k_z – коефіцієнт завантаження обладнання [31, с.10].

Фактичний коефіцієнт завантаження верстата за формулою (6.8):

$$\eta_{зф} = \frac{C_p}{P} \quad (6.8)$$

де P – прийнята кількість робочих місць [31, с.10].

Кількість операцій, що виконуються на робочому місці за формулою (6.9):

$$O = \frac{\eta_{зн}}{\eta_{зф}} \quad (6.9)$$

Таблиця 6.2 – Результати розрахунку коефіцієнта закріплення операцій початкового та рекомендованого ТП

Початковий ТП								
№ опер.	Опер.	$T_{шт-к, хв.}$	C_p	$P, \text{чол}$	$\eta_{зф}$	O	$K_{зоi}$	$K_{зо} \text{ (доз)i}$
080	Полірувальна	2160	6,541	7	0,934	0,86	0,86	-
Рекомендований ТП								
080	Віброабразивна	210	0,636	1	0,64	1,26	1,26	11,05

В рекомендованому ТП установка була дозавантажена іншими наборами лопаток та після дозавантаження $K_{зо} \text{ (доз)i} = 11,05$.

Таблиця 6.3 – Заробітна плата верстатника початкового та рекомендованого ТП

Початковий ТП							
№ опер.	Опер.	$T_{шт-к}$, хв.	$C_{тар}$, грн	$k_{доп}$	$k_{соц}$	$K_б$	$З_o$, грн
080	Полірувальна	2160	84,4	1,2	1,4	1	5104,512
Рекомендований ТП							
080	Віб्रोабразивна	210	65,1	1,2	1,4	1	248,81

Таблиця 6.4 – Амортизаційні відрахування на обладнання початкового та рекомендованого ТП

Початковий ТП						
№ опер.	Операція	T_o , хв.	K , грн	H_a , %	F_d	$A_{від}$, грн.
080	Полірувальна	1056,5	7800	7,7	4015	2,634
Рекомендований ТП						
080	Віброабразивна	112,5	78300	14,9	4015	5,448

Таблиця 6.5 – Витрати на інструмент початкового та рекомендованого ТП

№ опер	Операція	$T_{шт-к}$, хв.	Інструмент	C_i , грн	n_i , шт.	Стійкість T , хв	η_{m_i}	$S_{ін}$, грн
Початковий ТП								
080	Полірувальна	36,808	Шліф. круг	43	1	40	0,49	18,929
Рекомендований ТП								
080	Віброабразивна	210	Суміш	223	1	—	0,54	418,125

Таблиця 6.6 – Витрати на силову електроенергію початкового та рекомендованого ТП

Початковий ТП											
№ оп.	Операція	$T_{шт-к, хв.}$	$C_e, грн./ кВт \cdot год$	$N_e, кВт$	k_N	$k_{ч}$	$k_{од}$	k_W	η_e	k_B	S_e
080	Полірувальна	2160	3,45	20	0,8	0,6	1	1,08	0,85	1,1	24,1
Рекомендований ТП											
080	Віб्रोабразивна	210	3,45	20	0,8	0,6	1	1,08	0,85	1,1	100,42

Таблиця 6.7 – Витрати інші - загальновиробничі початкового та рекомендованого ТП

Початковий ТП				
№ опер.	Операція	$Z_o, грн$	$k_{заг}$	$I_n, грн$
080	Полірувальна	5104,512	0,2	1020,902
Рекомендований ТП				
080	Віброабразивна	248,812	0,2	49,762

Таблиця 6.8 – Витрати на ремонт та обслуговування оснащення початкового та рекомендованого ТП

Початковий ТП					
№ опер.	Операція	$C_{то}, грн$	$k_p, грн$	C_p	$S_p, грн$
080	Полірувальна	4056	0,02	6,541	0,816
Рекомендований ТП					
080	Віброабразивна	40716	0,02	0,636	0,518

Таблиця 6.9 – Параметри технологічної собівартості порівнюваних ТП, грн.

Параметри	Варіанти ТП	
	Початковий	Рекомендований
Z_o	5104,512	248,812
$A_{\text{від}}$	2,634	5,448
S_p	0,816	0,518
$S_{\text{ін}}$	18,929	418,125
S_e	24,1	100,42
I_n	1020,902	49,762
C_T	6190,82	835,396

Умовний економічний ефект за формулою (6.10):

$$E_{\text{yp}} = (C_1 - C_2) \cdot N \quad (6.10)$$

де $C_{1/2}$ – собівартість деталі початкового та рекомендованого ТП, відповідно грн.

$$E_{\text{yp}} = (6190,82 - 835,396) \cdot 650 = 3481027,95 \text{ грн.}$$

Основні проблеми використання ручної фінішної обробки лопаток полягають у наступному: може бути отримана нерівномірна текстура поверхні, що впливає на аеродинамічні характеристики авіадвигунів, цей метод є досить неефективним для фінішної обробки поверхонь лопаток, важко досягти цільової точності профілю. Якщо в початковому ТП один висококваліфікований слюсар 7-го розряду, обробляв одне перо лопатки ГТД від 40 до 120 хвилин, то в рекомендованому ТП під час віброабразивної обробки лопаток ГТД в установці віброгалтовки одразу обробляється весь

набір лопаток, всього 3,5 години. Тому із запровадженням віброабразивної обробки, майже всіх негативних факторів від ручного полірування можна позбутися, ще й при цьому суттєво скорочуючи витрати на виготовлення одного набору лопаток ГТД з 65 штук.

Відповідно оцінка очікуваної економічної ефективності від запровадження віброабразивної обробки становить 3481027,95 грн. Це доводить, що рекомендована технологія обробки є ефективною не тільки з точки зору технологічної, а й з економічної.

Тоді з переходом від ручної доволі трудомісткої праці, до більш ефективної, продуктивної віброабразивної обробки, котра суттєво економить кошти на виробництво, час виконання фінішно-оздоблювальної операції скорочується в 10...23 рази.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ

7.1 Вплив титану на здоров'я людини

Хімічний елемент титан (Ti), атомний номер 22, атомна маса 47,90. Його хімічна поведінка має багато спільного з кремнеземом і цирконієм, як елемента, що належить до першої перехідної групи. У водному розчині, особливо в нижчих ступенях окислення, він має певну схожість з хромом і ванадієм. Титан - легкий перехідний метал біло-сріблясто-металевого кольору. Він міцний, блискучий, стійкий до корозії. Чистий титан не розчиняється у воді, але розчиняється в концентрованих кислотах. Цей метал утворює пасивне, але захисне оксидне покриття (що призводить до корозійної стійкості) під впливом підвищених температур на повітрі, але при кімнатній температурі він протистоїть потемнінню.

Основний ступінь окислення 4+, хоча відомі також стани 3+ і 2+, але вони менш стабільні. Цей елемент горить на повітрі при нагріванні з утворенням діоксиду TiO_2 , а також у сполуках з галогенами. Він відновлює водяну пару, утворюючи діоксид і водень, і подібним чином реагує з гарячими концентрованими кислотами, хоча з хлоридною кислотою утворює трихлорид. Метал поглинає водень, утворюючи TiH_2 , і утворює нітрид, TiN , і карбід, TiC . Інші відомі сполуки - сірка TiS_2 , а також нижчі оксиди Ti_2O_3 і TiO та сірки Ti_2S_3 і TiS . Солі відомі в трьох ступенях окислення [32].

Діоксид титану широко використовується як білий пігмент у зовнішніх роботах завдяки своїй хімічній інертності, високій покривній здатності, непрозорості до ультрафіолетового випромінювання та здатності до самоочищення. Колись діоксид також використовували як відбілювач і як компонент у порцеляні, надаючи їй додаткової яскравості, твердості та кислотостійкості.

Титанові сплави характеризуються дуже високою міцністю на розрив навіть при високих температурах, легкою вагою, високою корозійною

стійкістю і здатністю витримувати екстремальні температури. Завдяки цим властивостям вони в основному використовуються в авіабудівній промисловості, трубах для електростанцій, броньованому покритті, військово-морських суднах, космічних апаратах і ракетах. Титан настільки ж міцний, як і сталь, але на 45% легший.

У медицині з титану виготовляють кульшові та колінні протези, кардіостимулятори, кісткові пластини та гвинти, а також черепні пластини для лікування переломів черепа. Він також використовується для кріплення штучних зубів.

Біологічна роль титану невідома. В організмі людини міститься певна кількість титану, і було підраховано [32], що ми отримуємо близько 0,8 мг/день, але більша частина проходить крізь нас, не адсорбуючись. Це не отруйний метал, і людський організм може переносити титан у великих дозах.

Елементарний титан і діоксид титану мають низький порядок токсичності. У лабораторних тварин (щурів), які зазнавали впливу діоксиду титану шляхом вдихання [32], в легенях утворюються невеликі локалізовані ділянки темних пилових відкладень. Надмірна експозиція у людей може призвести до незначних змін у легенях.

Наслідки надмірного впливу титанового порошку: Вдихання пилу може викликати стиснення та біль у грудях, кашель та утруднене дихання. Потрапляння на шкіру або в очі може викликати подразнення. Шляхи надходження: вдихання, контакт зі шкірою, контакт з очима.

7.2 Мінімізація впливу та токсичних ефектів

Вплив частинок TiO_2 на робочому місці можна контролювати за допомогою інженерних засобів, таких як місцева витяжна вентиляція та огороження для регулювання рівня в повітрі [33]. Під час роботи з TiO_2 слід

використовувати засоби захисту, такі як захисні окуляри, маски та комбінезони. Необхідно проводити регулярний моніторинг рівнів TiO_2 , а працівники мають пройти навчання з безпечного поводження, очищення та зберігання частинок. Для робочих функцій, які вимагають прямого впливу TiO_2 , працівники мають бути забезпечені функціональними респіраторами для захисту від твердих частинок. Також слід запровадити програму нагляду для моніторингу професійного здоров'я працівників, щоб запобігти раптовим захворюванням або смерті.

7.3 Вентиляція над шліфувальним обладнанням

Шліфування - це процес, в якому використовуються різні типи абразивних зерен і досягається різна якість поверхні для отримання високоякісної і гладкої поверхні. Пил і дим, що виділяються під час шліфування, як правило, є абразивними і можуть становити небезпеку пожежі та вибуху, залежно від матеріалу, що шліфується.

Для того, щоб створити ефективне і здорове робоче середовище, необхідно видаляти і фільтрувати дим і пил, викликані всіма цими матеріалами, з повітря, яким дихають працівники, здоровим і ефективним способом. Підприємства, які не посилюють запобіжні заходи щодо нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань, завдяки підвищенню обізнаності та інформованості в останні роки, відчувають нестачу кваліфікованих кадрів і стикаються з судовими позовами з серйозними наслідками в довгостроковій перспективі. Компанії, які вживають заходів щодо запобігання нещасним випадкам на виробництві та професійним захворюванням на найвищому рівні, підвищують продуктивність завдяки задоволеності працівників, а також забезпечують сталий розвиток виробничого центру.

Системи збору пилу, що використовуються для всмоктування і фільтрації пилу і парів під час шліфування, мають вирішальне значення для ефективного збору і фільтрації субмікронних частинок (менше 1 мкм) [33].

Зона, в якій знаходиться витяжна установка (рис. 7.1), відіграє вирішальну роль в ефективній фільтрації парів, що виділяються під час шліфування. У процесах, де фільтруючі матеріали можуть бути підібрані неправильно, можуть виникнути небажані наслідки, такі як часте засмічення фільтрів, високе споживання електроенергії, часті паузи в процесі подрібнення. Тому необхідно використовувати високоякісні фільтрувальні матеріали.



Рисунок 7.1 – Промислова витяжна установка [34]

Крім фільтруючого матеріалу, хороший пиловловлювач повинен мати високоефективну систему очищення, просте обслуговування та універсальні запасні частини.

7.4 Розрахунок місцевої вентиляції

Розрахунок витяжних шаф. Об'єм повітря, що видаляється від витяжних шаф за формулою (7.1):

$$L = F \cdot V \cdot 3600 \quad (7.1)$$

де F – площа робочого отвору (відкритих проїомів та нещільностей), м^2 ;

V – швидкість руху вилученого повітря через відкриті робочі отвори, м/с .

Приймається від 0,5 до 1,7 м/с в залежності від токсичності та леткості газів та парів, що видаляються.

$$L = 7 \cdot 0,5 \cdot 3600 = 12600 \text{ м}^3/\text{год}$$

Розрахунок кількості повітря, що видаляється від шліфувальних та полірувальних верстатів (7.2) [35, с. 11]:

$$L = k d_{\text{кр}} n, \quad (7.2)$$

де $d_{\text{кр}}$ – діаметр круга, мм ;

k – коефіцієнт, що залежить від матеріалу та діаметра круга;.

N – число кругів.

$$L = 1,3 \cdot 0,25 \cdot 1 = 0,325 \text{ м}^3/\text{год}$$

Від кожуха верстака полірувального ТМ-2 вилучається приблизно 0,3 $\text{м}^3/\text{год}$ повітря. Необхідний повітрообмін для створення нормальних умов в приміщенні становить $L = 12600 \text{ м}^3/\text{год}$.

ВИСНОВОК

У цьому дослідженні були розглянуті основні аспекти технологічного процесу фінішно-оздоблювальної обробки титанових лопаток компресору газотурбінних двигунів (ГТД). Робота розпочалася з обґрунтування дослідницької теми, де було визначено необхідність дослідження даного питання в контексті сучасних технологічних вимог та розвитку авіаційної промисловості. Актуальність цієї теми підкреслена тим, що якість обробки титанових лопаток ГТД безпосередньо впливає на ефективність та безпеку авіаційних двигунів.

Далі в роботі був проведений аналіз літературних джерел, що стосуються різних аспектів різних методів фінішно-оздоблювальної обробки. Також досліджено технології ручного полірування, ВШФ та віброабразивної обробки. Цей аналіз дозволив виявити переваги та недоліки кожного методу обробки, а також визначити можливі шляхи підвищення продуктивності та якості фінішного етапу виготовлення лопаток.

Віброабразивне полірування є перспективним методом для видалення "строчок" і дефектного шару після ВШФ лопаток компресора, що дає змогу відмовитися від ручної праці на фінішному етапі їх обробки.

Отримані показники шорсткості, поверхневого наклепу і розподілу залишкових напружень за глибиною поверхневого шару лопаток з титанового сплаву ВТ8 дали можливість встановити раціональну тривалість віброабразивного полірування - 5 годин.

Встановлено, що віброабразивна обробка забезпечує встановлену межу втомної міцності лопаток компресора, яка складає 400 МПа.

Розрахунок моделі деталі на міцність показав зниження максимальних напружень на 30% після видалення «строчок».

Застосування запропонованого раціонального варіанту технології віброабразивного полірування пера лопаток після високошвидкісного

фрезерування на оптимальних режимах, дає змогу збільшити продуктивність фінішного етапу обробки від 6 до 25 разів залежно від кількості лопаток у наборі.

Також з переходом від ручної доволі трудомісткої праці, до більш ефективної, продуктивної віброабразивної обробки, котра суттєво економить кошти на виробництво, час виконання фінішно-оздоблювальної операції скорочується в 10...23 рази.

З метою усунення дефектів поверхні – «строчок», що наводяться після ВШФ обробки лопаток компресора (робочих і напрямних) з титанового сплаву BT8, рекомендується впровадження операції віброполірування і наступні **технологічні рекомендації**:

1) Операція чистового фрезерування: оброблювальний центр з ЧПК «Starrag SX051 B/C» фреза $\varnothing 3,2$ мм, $t = 0,7$ мм; $S = 0,1$ мм/об ($S_{хв} = 1435$ мм/хв, $S_{зуб} \geq 0,045$ мм/зуб); $n = 7960$ об/хв; $V_p = 80$ м/хв, час виконання 18 хв, лопатки обробляються послідовно;

2) Операція віброабразивного полірування: установка «Rösler» R220 EC; частота обертання електродвигуна 1500 об/хв; амплітуда коливання – 3...4 мм; абразивний наповнювач марки OFGS/S 09/09 масою 125...150 кг; тривалість 5 годин; лопатки обробляються одночасно.

За результатами досліджень було опубліковано 2 публікації:

- Слободян А.Г. Порівняння різновидів фінішної обробки лопаток компресору авіаційних двигунів для подальшого її вдосконалення [Електронний ресурс] // А.В. Бобровнік, Н.В. Гончар // Тиждень науки-2023. Машинобудівний факультет. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 24–28 квітня 2023 р., НУЗП. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. С.18-19.

- Гончар Н.В. Оптимізація технологічного процесу виготовлення лопаток в умовах одиничного виробництва ГТД // М.О. Гребенніков., В.Л. Криворученко, А.Г. Слободян // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023) : матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції, Чернігів, 25–26 травня 2023 р., НУЧП. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. - Т. 1. - С.218.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. HUANG Yun, LI Shaochuan, XIAO Guijian, CHEN Benqiang, ZHANG Youdong, HE Yi, SONG Kangkang. Research progress of aero-engine blade materials and anti-fatigue grinding technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(4): 17-35.
2. HEXAGON. Aero engine compressor and turbine blade inspection. Електронний ресурс: <https://hexagon.com/resources/resource-library/aero-engine-compressor-turbine-blade-inspection> (дата звернення 21.09.2023)
3. Yao C, Zhang J, Cui M et al (2020) Machining deformation prediction of large fan blades based on loading uneven residual stress. Int J Adv Manuf Technol 107(9/10):4345–4356.
4. Guo M, Jiang X, Ye Y et al (2019) Investigation of redistribution mechanism of residual stress during multi-process milling of thin-walled parts. Int J Adv Manuf Technol 103(1/4):1459–1466.
5. Jain, A., & Bajpai, V. (2020). Introduction to high-speed machining (HSM). High Speed Machining, 1–25. doi:10.1016/b978-0-12-815020-7.00001-1.
6. Manufacturing News. Blisk Five-Axis High-Feed Milling. Електронний ресурс: <https://www.mfgnewsweb.com/archives/4/53652/Specific-Application-Machinery-jan19/Blisk-Five-Axis-High-Feed-Milling.aspx> (дата звернення 23.09.2023).
7. Fu, Y., Gao, H., Wang, X., & Guo, D. (2017). Machining the Integral Impeller and Blisk of Aero-Engines: A Review of Surface Finishing and Strengthening Technologies. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 30(3), 528–543. doi:10.1007/s10033-017-0123-3.
8. Liu, Y., Li, Q., Xiao, G., & Huang, Y. (2019). Study of the Vibration Mechanism and Process Optimization for Abrasive Belt Grinding for a Blisk-Blade. IEEE Access, 7, 24829–24842. doi:10.1109/access.2019.2899495.
9. Zhu, D., Feng, X., Xu, X., Yang, Z., Li, W., Yan, S., & Ding, H. (2020). Robotic grinding of complex components: A step towards efficient and intelligent

machining – challenges, solutions, and applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65, 101908. doi:10.1016/j.rcim.2019.101908.

10. Huang, Zhi; Yang, Xing; Min, Jie; Wang, Hongyan; Wei, Pengxuan. (2022). Collision detection algorithm on abrasive belt grinding blisk based on improved octree segmentation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* . 2/10/2022, Vol. 118 Issue 11/12, p4105-4121. 17p.

11. Electro Polishing. Electrolytic polishing effective for high hygiene control and your product composition stability Электронный ресурс: https://nissho-astec.com/business_top/manufacturing-process/electro_polishing/ (дата звернення 24.09.2023).

12. OTEC PRECISION FINISHING SOLUTIONS. Electro finishing machine – EF-PERFORMANCE. Электронный ресурс: <https://www.otec.de/en/products/electro-finishing/ef-performance/> (дата звернення 28.09.2023).

13. ERVIN. Guide to Shot Blasting. Электронный ресурс: <https://www.ervin.eu/shot-blasting-guide/> (дата звернення 28.09.2023).

14. Editorial by Industrial Quick Search. Sandblasting Machinery. Электронный ресурс: <https://www.iqsdirectory.com/articles/sandblasting/sandblasting-machinery.html> (дата звернення 30.09.2023).

15. Tan, K. L., Yeo, S.-H., & Ong, C. H. (2016). Nontraditional finishing processes for internal surfaces and passages: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(13), 2302–2316. doi:10.1177/0954405415626087.

16. Гончар Н.В., Кондратюк В.Э., Степанов Д.Н. Повышение несущей способности дисков компрессоров авиационных ГТД / Запорожье: ЗНТУ, 2016. – 160 с.

17. JET MILL MFC.FLUIDIZED BED JET MILL. Электронный ресурс: <https://www.jetmillmfg.com/fluidized-bed-jet-mill/> (дата звернення 29.09.2023)

18. BONS J P. A review of surface roughness effects in gas turbines. *Journal of Turbomachinery*, 2010, 132(2): 1-16.

19. BAMMERT K, SANDSTEDE H. Measurement of the boundary layer development along a turbine blade with rough surface. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1980, 102(4): 978-983.
20. ABUAF N, BUNKER R S, LEE C P. Effects of surface roughness on heat transfer and aerodynamic performance of turbine airfoils. *Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(3): 522-529.
21. HUMMEL F, LO" TZERICH M, CARDAMONE P, et al. Surface roughness effects on turbine blade aerodynamics. *Journal of Turbomachinery*, 2005, 127(3): 453-461.
22. BOYNTON J L, TABIZADEH R, HUDSON S T. Investigation of rotor blade roughness effect on turbine performance. *Journal of Turbomachinery*, 1993, 115(3): 614-620.
23. YUAN Z J, WANG X K. Precision and ultra-precision manufacturing technology. Beijing: China Machine Press, 2011.
24. SUDER K L, CHIMA R V, STRAZISAR A J. The effect of adding roughness and thickness to a transonic axial compressor rotor. *Journal of Turbomachinery*, 1995, 117(4): 491-505.
25. Kacaras, A., Gibmeier, J., Zanger, F., & Schulze, V. (2018). Influence of rotational speed on surface states after stream finishing. *Procedia CIRP*, 71, 221–226. doi:10.1016/j.procir.2018.05.067.
26. Ahluwalia, K., Mediratta, R., & Yeo, S. H. (2016). A novel approach to vibratory finishing: Double vibro-polishing. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(9), 998–1003. doi:10.1080/10426914.2016.1232812.
27. INOVATEC Machinery. Vibratory Deburring Machine. Электронный ресурс: <https://www.inovatecmachinery.com/product/vibratory-deburring-machine/> (дата звернення 25.09.2023).
28. Bańkowski Damiana, Krajcarz Daniela, Młynarczyk Piotr. (2017). Deburring and smoothing the edges using vibro-abrasive machining. *Procedia Engineering* 192 (2017) 28 – 33.
29. ГОСТ 19807 – 91 Титан и сплавы титановые деформируемые.

30. Honchar N., Tryshyn P., Kondratiuk E., Grebennikov M., Myronova N. Improving aircraft engine compressor blade finishing. *Advances in Mechanical and Power Engineering (CAMPE 2023)*, part of Springer Nature 2023.

31. Методичні рекомендації для дипломного проєктування “Оцінка економічної ефективності технічних рішень” для студентів зі спец. 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / Укл. Г.В. Пухальська – Запоріжжя: НУ«Запорізька політехніка», 2023 – 43 с.

32. Titanium – Ti. Chemical properties of titanium - Health effects of titanium - Environmental effects of titanium. Електронний ресурс: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/ti.htm#ixzz8JuFMpyuu> (дата звернення 05.10.2023).

33. Taiwo Ayorinde, Christie M. Sayes (2023). An updated review of industrially relevant titanium dioxide and its environmental health effects. *Journal of Hazardous Materials Letters*, Volume 4. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2023.10008>.

34. Grinding. Bomaksan industrial air filtration system. Електронний ресурс: <https://bomaksan.com/sector/grinding/> (дата звернення 05.10.2023).

35. Методичні вказівки до практичної роботи «Визначення параметрів умов праці при атестації робочих місць» з дисципліни «Охорона праці в галузі» для студентів всіх форм навчання / Укл. О.Л. Скуйбіда - Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. – 18 с.

ДОДАТОК А

Результати контролю розмірів пера лопаток по перетинах
методом 3D сканування на ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес»

Таблиця А.1 – Розміри профілю пера після скороченого фрезерування та без припуску під ручне полірування лопаток (вихідні лопатки під фінішну обробку партій № 4, 5, 6)

№	C ₁					C ₂					C _{max}					L				
	A ₂	A ₃	A ₅	A ₇	A ₁₀	A ₂	A ₃	A ₅	A ₇	A ₁₀	A ₂	A ₃	A ₅	A ₇	A ₁₀	A ₂	A ₃	A ₅	A ₇	A ₁₀
"1"	1,70	1,64	1,51	1,40	1,32	1,00	0,96	0,84	0,73	0,67	2,10	2,03	1,88	1,74	1,64	22,30	22,31	22,32	22,32	22,34
"1,5"	1,71	1,66	1,53	1,41	1,29	1,01	0,97	0,86	0,77	0,66	2,11	2,05	1,9	1,75	1,61	22,31	22,33	22,33	22,34	22,32
"2"	1,64	1,59	1,46	1,34	1,28	0,94	0,91	0,80	0,70	0,64	2,04	1,98	1,83	1,68	1,60	22,31	22,31	22,32	22,31	22,32

Таблиця А.2 – Розміри профілю пера лопаток після віброабразивного полірування (партія № 4)

№	C ₁					C ₂					C _{max}					L				
	A ₂	A ₃	A ₅	A ₇	A ₁₀	A ₂	A ₃	A ₅	A ₇	A ₁₀	A ₂	A ₃	A ₅	A ₇	A ₁₀	A ₂	A ₃	A ₅	A ₇	A ₁₀
"1"	1,69	1,64	1,51	1,40	1,32	1,00	0,96	0,85	0,74	0,69	2,09	2,02	1,87	1,74	1,63	22,28	22,28	22,27	22,24	22,26
"1,5"	1,69	1,64	1,51	1,39	1,29	1,00	0,96	0,85	0,76	0,66	2,09	2,02	1,88	1,74	1,60	22,28	22,28	22,26	22,23	22,15
"2"	1,60	1,57	1,44	1,32	1,25	0,91	0,89	0,79	0,69	0,63	2,00	1,95	1,80	1,66	1,56	22,26	22,25	22,24	22,23	22,21

Таблиця А.3 – Розміри профілю пера лопаток після підготовки поверхні фетровим кругом і віброабразивного полірування (партії № 5, 6)

№	C ₁					C ₂					C _{max}					L				
	A ₂	A ₃	A ₅	A ₇	A ₁₀	A ₂	A ₃	A ₅	A ₇	A ₁₀	A ₂	A ₃	A ₅	A ₇	A ₁₀	A ₂	A ₃	A ₅	A ₇	A ₁₀
"1"	0,01	0	0	0	0	0	0	-0,01	-0,01	-0,02	0,01	0,01	0,01	0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,08	0,08
"1,5"	0,02	0,02	0,02	0,02	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,05	0,07	0,11	0,17
"2"	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,04	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,08	0,11

ДОДАТОК Б

Протокол втомних досліджень на ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес»

Параметри дослідження: $\sigma = 400$ МПа на базі 100 млн циклів, кількість лопаток – 6 шт.

Вид испытаний подтверждение предела выносливости						
Инструкция 18Т 0000000 И18.3						
Параметры испытаний $\sigma_{-1}=40$ кгс/мм ² ; $N_6=10^8$ циклов						
Вибростенд ВЭДС-400						
Параметры нагружения и результаты испытаний						
Инд. Номер	Маркировка	σ , кгс/мм ²	f , Гц	N , Циклов	КГО	Результаты цветной ЛЮМ 1-ОВ дефектоскопии
–	SB-1-210	40	553	10^8	–	Разрушений нет
–	SB-1-211	40	558	10^8	–	Разрушений нет
–	SB-1-212	40	558	10^8	–	Разрушений нет
–	SB-1-213	40	560	10^8	–	Разрушений нет
–	SB-1-214	40	546	10^8	–	Разрушений нет
–	SB-1-215	40	545	10^8	–	Разрушений нет

Заключение.
 – Лопатки данной партии по характеристикам усталостной прочности соответствуют требованиям инструкции ~~18Т 0000000 И18.3~~

Рисунок Б.1 – Протокол втомного дослідження лопаток після ВАП з постійним навантаженням (контрольне значення напружень 400 МПа)