

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ІЩЕНКО ГРИГОРІЙ ІВАНОВИЧ



УДК 621.9

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ
СЛОЖНОПРОФІЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ТУРБІННИХ ЛОПАТОК З
ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі машинобудування, транспорту і зварювання Української інженерно-педагогічної академії Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Тарасюк Анатолій Петрович,
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків,

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Степанов Михайло Сергійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
професор кафедри технології машинобудування
та металорізальних верстатів;

доктор технічних наук, професор
Іванов Віталій Олександрович,
Сумський державний університет, м. Суми,
завідувач кафедри технології машинобудування,
верстатів та інструменту.

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «29» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ніна ЗУБКОВА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Енергоринок на території України почав розвиватися з початку сімдесятих років минулого століття. Україна, в силу її потенціалу та географічного положення, грала в стратегічному плануванні розвитку енергетики особливу роль. На теплових електростанціях України працює 91 парова турбіна різної потужності, в тому числі 48 турбін виробництва АТ «Турбоатом», крім того, 20 парових турбін потужністю 220 МВт і 1000 МВт працюють на АЕС України та країн далекого зарубіжжя (Фінляндії, Угорщини, Болгарії). На сьогоднішній день тепла енергетика України перебуває в дуже складному становищі через фізичний і моральний знос основних фондів.

Значна частина цих турбін: 91,3% потужністю 150 і 200 МВт; 92,7% потужністю 300 МВт - знаходяться в експлуатації від 20 до 40 років, їх лопаткові апарати відпрацювали свій розрахунковий, подовжений ресурс або наближаються до цього і вимагають модернізації та заміни. Заміна і модернізація цих турбін передбачені Енергетичною стратегією України на період до 2035 року.

Заміна турбін повинна проводитися на сучасному технічному рівні з підвищенням їх потужності і ККД. Це досягається, в першу чергу, за рахунок впровадження в конструкцію турбін нових лопаток із сучасною геометрією, яка дозволяє підвищити економічність паротурбінних установок і зробити їх конкурентоспроможними за цим параметром на зовнішньому і внутрішньому ринках. Для забезпечення цих завдань настійно необхідне підвищення технічного рівня механообробного виробництва лопаток.

Лопатковий апарат парових турбін характеризується, крім складності конструкції, великою трудомісткістю виготовлення. В середньому його трудомісткість становить 30-35% загальної трудомісткості виготовлення турбіни. Тому вдосконалення операцій виготовлення елементів лопатки (робочого профілю, хвоста і бандажа) приділялося раніше і в даний час підвищена увага технологів і дослідників.

Необхідність рішення даної задачі продиктована високими вимогами, які пред'являються до точності, якості та ефективності обробки деталей з важкооброблюваних матеріалів в турбінобудуванні. Перспективним рішенням даної задачі може бути пошук шляхів формування раціональної структури технологічного процесу обробки турбінних лопаток з титанових сплавів, впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій технологічного процесу, модернізація верстатного устаткування з впровадженням технологічного оснащення як основи забезпечення якості та зниження трудомісткості виготовлення. Відсутність практичних рекомендацій в цьому напрямку вимагає проведення комплексу теоретичних і експериментальних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота відповідає Енергетичній стратегії України до 2035 р. з продовження експлуатації діючих енергоблоків АЕС. Робота виконана в рамках завдань, що

вирішувалися АТ «Турбоатом» по інвестиційній програмі технічного переозброєння до 2025 р. та програмі участі у модернізації обладнання АЕС України на 5-річний період (2020-2024 р.р.) з ДП НАЕК «Енегоатом».

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є забезпечення якості та зниження трудомісткості обробки складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів при вдосконаленні шліфувальних і полірувальних операцій технологічного процесу.

Для досягнення мети в роботі поставлені наступні **задачі**:

- провести системний аналіз проблеми виготовлення складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів в турбінобудуванні, конструктивних і технологічних особливостей лопаток парових турбін, теорії та практики забезпечення якості та зниження трудомісткості обробки;

- дослідити та розробити шляхи формування раціональної структури технологічного процесу обробки складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів як основи забезпечення якості і зниження трудомісткості обробки;

- дослідити можливості впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій технологічного процесу як основи забезпечення якості і скорочення циклів виготовлення деталей;

- використовуючи методику багатофакторного планування експериментів провести дослідження фінішної операції шліфування поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів, розробити рекомендації щодо вибору оптимальних режимів різання;

- розробити рекомендації та виконати модернізацію верстатного устаткування з впровадженням технологічного оснащення для підвищення ефективності обробки складнопрофільних поверхонь лопаток з титанових сплавів і зниження трудомісткості збірки і монтажу робочого колеса турбіни

- впровадити результати досліджень і рекомендацій у виробництво.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення турбінних лопаток з титанових сплавів.

Предмет дослідження – раціональна структура технологічного процесу, закономірності шліфувальних та полірувальних операцій обробки складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів, які забезпечують якість, зниження трудомісткості виготовлення та стабільність методів механічної обробки.

Методи дослідження. На основі системного аналізу досліджено проблему забезпечення якості та зниження трудомісткості виготовлення складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів. Теоретичні дослідження базуються на основних положеннях технології машинобудування, теорії формоутворення та основ формування точності й якості поверхонь деталей машин. Удосконалення технології виготовлення лопаток, пошук раціональної структури технологічного процесу та оцінка трудомісткості варіантів виконувалася з використанням методів імітаційного моделювання. Оптимальність процесу шліфування визначалася із

застосуванням методики багатофакторного планування експерименту. Достовірності розроблених теоретичних положень перевірено шляхом лабораторно-промислових випробувань.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що на основі системного аналізу закономірностей технологічних процесів виготовлення деталей з важкооброблюваних матеріалів розроблений і запропонований новий підхід до забезпечення якості та зниження трудомісткості обробки складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів при вдосконаленні структури технологічного процесу і параметрів фінішних операцій. Для цього:

- сформульована і теоретично обґрунтована гіпотеза про можливість вдосконалення існуючої і формування раціональної структури технологічного процесу обробки турбінних лопаток з важкооброблюваних матеріалів як основи зниження трудомісткості, забезпечення якості та стабільності фінішних методів механічної обробки з обмеженнями в умовах модернізації виробництва;

- отримала подальший розвиток ідея технологічного забезпечення якості обробки складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів впровадженням сучасних методів і засобів контрольних операцій технологічного процесу як основа скорочення циклів виготовлення деталей;

- із застосуванням методики багатофакторного планування експериментів розроблено математичні моделі параметрів оптимізації фінішної операції шліфування поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів, що дозволили розробити рекомендації щодо вибору оптимальних режимів різання, які забезпечують необхідну якість і стабільність методу обробки. Оптимізація виконується за питомою собівартістю обробки при обмеженні умов шліфування за якісними показниками процесу - шорсткості обробленої поверхні і контактної температури;

- експериментально досліджено метод високопродуктивного шліфування титанових сплавів без використання мастильно-охолоджуючих засобів, вперше розроблені рекомендації щодо застосування високоструктурних абразивних кругів на керамічних зв'язках, у яких щільність і твердість повинні відповідати певному швидкісного режиму, яки виключають прийоги оброблюваної поверхні;

- сформульовані рекомендації по модернізації верстатного устаткування і впровадження технологічного оснащення для підвищення ефективності обробки складнопрофільних поверхонь лопаток з титанових сплавів і зниження трудомісткості збірки і монтажу робочого колеса турбіни.

Практичне значення отриманих результатів для технології машинобудування полягає у розробці методики проектування раціональної структури технологічного процесу обробки складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів, впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій технологічного процесу, шліфувальних і полірувальних операцій з використанням високоструктурних абразивних кругів. Запропоновано нові конструкції інструменту (Патент України на

корисну модель № 128773, Бюл. № 19 від 10.10.2018 р.) та рекомендації щодо вибору оптимальних режимів різання.

Результати роботи використані при розробці технологічних процесів обробки турбінних лопаток з титанових сплавів на АТ «Турбоатом» (м. Харків), що дозволило знизити трудомісткість виготовлення лопатки на 30%, скоротити цикл виробництва комплекту (100 штук) для одного ряду турбіни в два рази. Впровадження операції зборки ряду на новому спеціальному пристосуванні (технологічному диску) в заводських умовах із загальною трудомісткістю 8 годин дозволяє скоротити час монтажу ряду на станції з двох тижнів до двох діб.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, що подаються в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто, в період з 2010-2020рр. Серед них: аналітичні дослідження проблеми виготовлення сложнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів в турбінобудуванні; вирішення проектних технологічних задач та розробка методики вибору раціональної структури технологічного процесу обробки сложнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів, обґрунтування впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій технологічного процесу; експериментальні дослідження фінішної операції шліфування поверхонь; рекомендації з модернізації верстатного устаткування та впровадженням технологічного оснащення для підвищення ефективності обробки, складання і монтажу робочого колеса турбіни.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на ХІХ міжнародному науково-технічному семінарі «Високі технології: тенденції розвитку, нормативно-технічне регулювання "Интерпартнер-2011» (м.Алушта, 2011р.); ХХІІІ міжнародному науково-технічному семінарі «Високі технології: тенденції розвитку» (м.Одеса, 2015 р.); ХХХ міжнародній конференції «Нові технології в машинобудуванні», (Коблево, 2020 р.).

Дисертаційна робота у повному обсязі доповідалась, обговорювалась та отримала позитивну оцінку на розширеному засіданні наукового семінару кафедри машинобудування, транспорту і зварювання Української інженерно-педагогічної академії.

Публікації. Основні положення дисертації знайшли своє відображення в 17 наукових працях, серед яких 11 статей у провідних фахових виданнях України, 1 стаття у виданні, індексованому у міжнародній базі даних Scopus, 1 стаття в іноземному виданні, 1 патент України, 3 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації становить 184 сторінки машинописного тексту, включаючи 75 рисунків, 17 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й завдання дослідження, наведено його наукову новизну й практичну цінність.

В першому розділі аналізуються організаційно-технологічні завдання забезпечення конкурентоспроможності та імпортозаміщення в турбінобудуванні.

Харківський турбогенераторний завод, побудований в 1934 році за проектом американської фірми Дженерал Електрик і починав з випуску турбін як її ліцензіат, сьогодні має замкнутий цикл виробництва турбін від проектно-конструкторських робіт до натурних випробувань і всесвітньо відомий бренд «Турбоатом». За накопиченим досвідом розробок і обсягом встановлених потужностей турбін для АЕС АТ «Турбоатом» успішно конкурує з найбільшим в Європі німецьким транснаціональним концерном Сіменс і найбільшою багатогалузевою виробничою групою Японії Міцубісі, разом з великою французькою компанією Альстом і американськими транснаціональними гігантами Вестінгауз і тієї ж Дженерал Електрик (рис.1) входить в четвірку світових конкуруючих лідерів атомного енергомашинобудування, на частку яких сукупно припадає 2/3 глобального ринку.

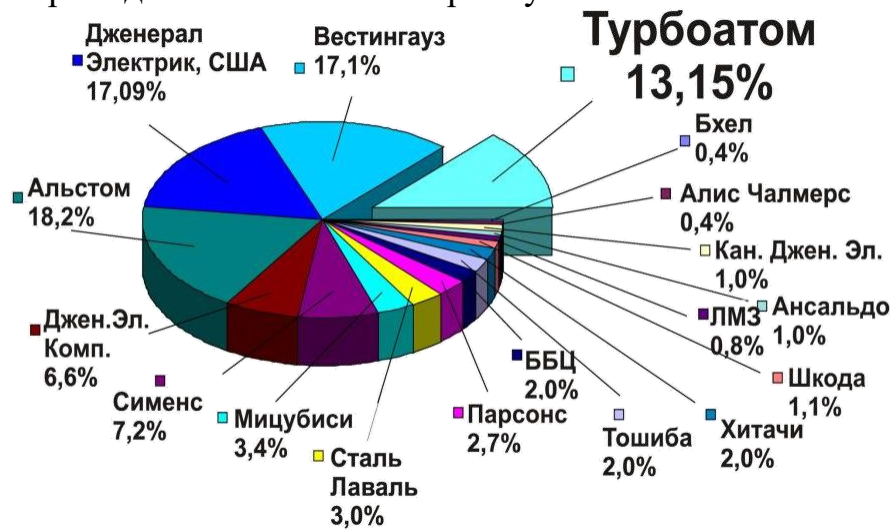


Рисунок 1 – Розподіл потужностей турбін для АЕС по фірмам-виробникам

У 2014 р була поставлена задача з імпортозаміщення при виконанні робіт по ремонту і модернізації на українських блоках АЕС. Однією з основних була задача виготовлення робочих лопаток 5-го ступеня з титанового сплаву для роторів низького тиску на швидкохідних турбінах К-1000, що дозволить виконувати заміну лопаток виробництва «Силові машини» (РФ) (рис.2).

Такої модернізації вимагають 5 блоків АЕС України: Хмельницька АЕС №1, №12 - 2 блоки; Південноукраїнська АЕС №3 - 1 блок; Рівненська АЕС №3, №4 - 2 блоки. Продукція повинна бути конкурентоспроможна і дозволяти скоротити цикли монтажу на АЕС. У роботі проведена оцінка технологічних можливостей АТ «Турбоатом» за рішенням поставленого завдання.

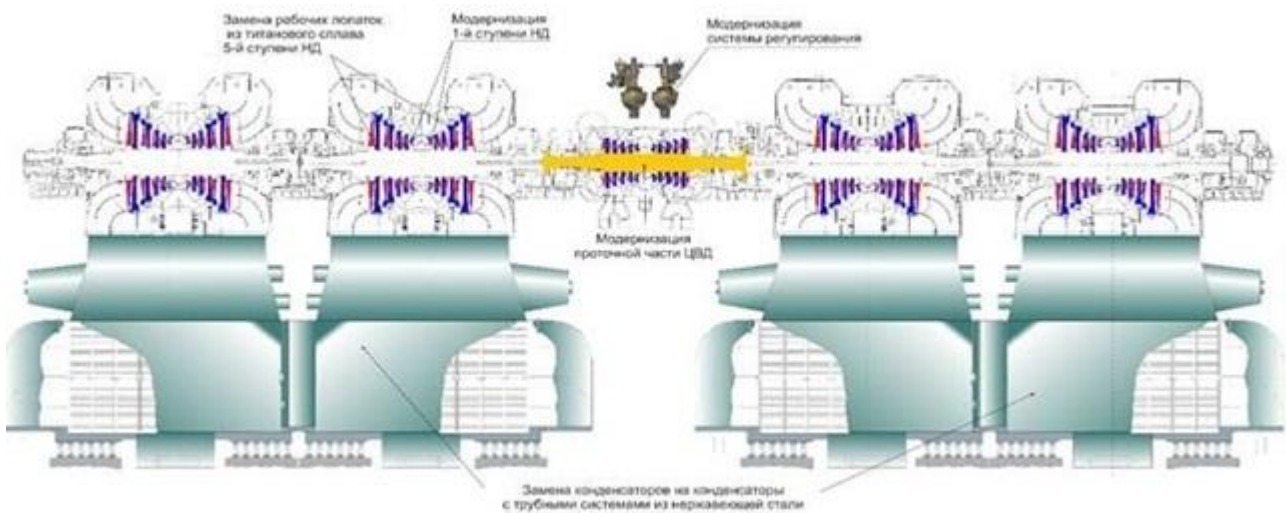


Рисунок 2 – Ескіз турбіни К-1000-60/3000 ЛМЗ, Силві машини, РФ

З використанням науково-технічної літератури проаналізовані конструктивні особливості, основні вимоги до механічної обробки лопаток парових турбін і їх технологічність.

У другому розділі оцінено сучасний стан та методи забезпечення якості та продуктивності обробки складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів в турбінобудуванні.

На заводі «Турбоатом» накопичений великий досвід виробництва турбінних лопаток різного призначення. Так, завдання з імпортозаміщення при виконанні робіт по ремонту і модернізації на українських блоках АЕС полягає в заміні сталевих лопаток циліндрів низького тиску останніх ступенів на турбінах К-1000-60-3000 на титанові лопатки (рис.3).

Особливістю базового техпроцесу сталевий лопатки 1450 останнього ступеня роторів низького тиску турбіни К-1000 є прийнята на основі рекомендацій і досвіду виробництва послідовність обробки частин лопатки. Спочатку обробляється хвіст який згодом використовується в якості технологічної бази при обробці робочої частини і бандажа лопатки. У процесі налагодження базового технологічного процесу обробки сталевий лопатки проводився комплекс організаційно-технологічний заходів з метою зниження трудомісткості виготовлення.

В якості основи забезпечення параметрів точності виготовлення партії лопаток покладена еталонна деталь.

Це стосується як контрольних операцій з використанням спеціального оснащення у вигляді контрольно-вимірювальних пристроїв з профільними шаблонами так і механічної обробки заготовки на копіювально-фрезерних верстатах моделі «Форест», для яких в якості копіра використовується еталонна деталь. Основна трудомісткість технологічної підготовки виробництва в цьому випадку власне і полягає у виготовленні еталонних елементів операцій механічної обробки і контролю.

Матеріал лопатки	15X11МФШ	ВТ 6
Довжина профільної частини	1450 мм	1200 мм
Корневої діаметр	2700 мм	1800 мм
Торцова площа вихлопу	18,9 мм ²	11,3 мм ²
Віяльність	2,86	2,5
Периферійна окружна швидкість	440 м/с	663 м/с
Відцентрова сила активної частини (з урахуванням бандажів)	1980кН	1753кН
Відцентрова сила лопатки з хвостовиком	2310кН	2122кН
Маса лопатки	51,2 кг	17,2 кг

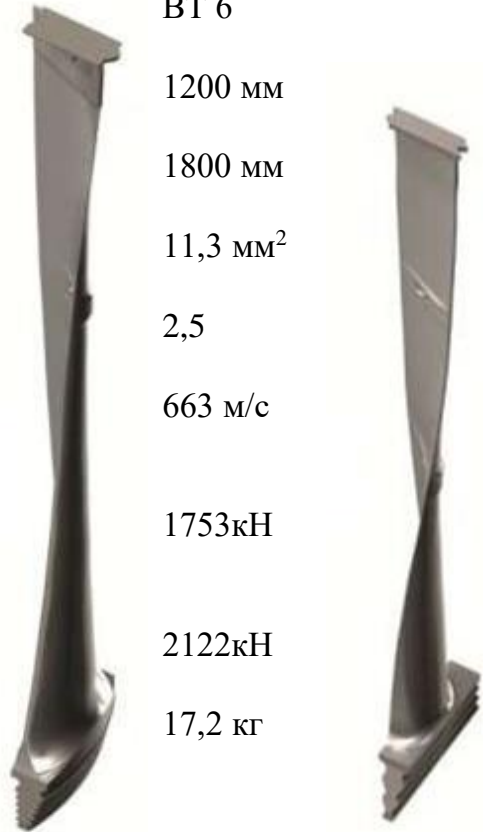


Рисунок 3 – Загальний вигляд і характеристики сталевий і титанової лопатки

По конструкції лопатки парових турбін відносяться до деталей, які описані складними поверхнями. Робочий профіль являє собою поєднання ділянок кількох радіусних поверхонь, причому ці поверхні змінюють уздовж осі лопатки своє просторове розташування. Практика виготовлення лопаток на АТ "Турбоатом" показала, що на попередній обробці в ряді випадків мають місце міжопераційні відхилення розмірів, що вимагають доробки і виправлень в межах допусків. Це призводить до подорожчання продукції.

З метою встановлення фактичної точності виготовлення робочих профілів лопаток, і виявлення факторів, що домінуючі вплив на виникнення похибок, було проведено статистичне дослідження та надано рекомендації: для підвищення точності операції фрезерування робочого профілю лопаток необхідно забезпечити рівномірний розподіл припуску в поперечних перетинах профілю, для чого при обробці елементів хвостової частини в якості бази використовувати робочий профіль заготовки.

Резервом підвищення точності обробки та зниження трудомісткості виготовлення лопаток з титанового сплаву є перегляд структури технологічного процесу (черговості обробки частин лопатки) і впровадження сучасних методів и засобів контрольних операцій з метою мінімізації припусків на механічну обробку дорогих заготовок.

У третьому розділі розрабан і представлений технологічний процес обробки титанової лопатки виробництва «Турбоатом» (рис.4)

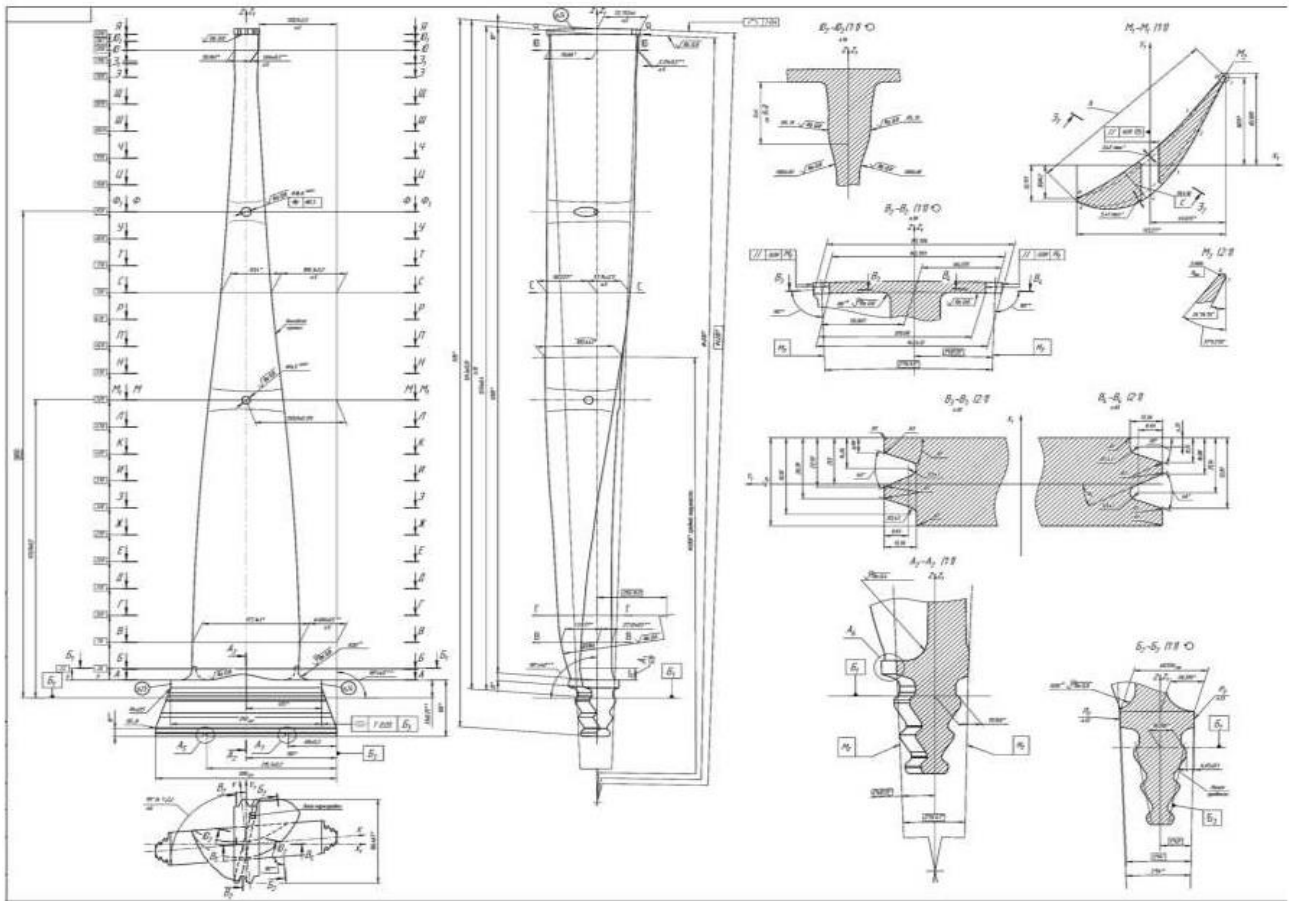


Рисунок 4 - Ескіз титанової лопатки останнього ступеня швидкохідної турбіни К-1000-60/3000

Точність виготовлення робочої частини складає від 0,3 до 0,03 мм. При проектуванні закладається точність розрахунку 0,001 мм. Другою важливою вимогою є якість поверхні (шорсткість поверхні Ra 0,32-1,25 мкм).

На рис.5 показані найбільш відповідальні операції розробленого технологічного процесу, що зажадали вдосконалення методів механічної обробки і контролю, модернізації технологічного обладнання та впровадження сучасного інструменту.

Після виготовлення комплекту лопаток (100 шт.) виконується складання робочого ряду з проведенням відповідних перевірок і випробувань (рис.6). Впровадження операції складання ряду на новому спеціальному пристосуванні (технологічному диску) в заводських умовах із загальною трудомісткістю 8 годин дозволяє скоротити час монтажу ряду на станції з двох тижнів до двох діб.

Аналіз сучасного стану методів забезпечення якості обробки робочих поверхонь лопаток і обладнання для їх здійснення показав, що процес остаточної обробки профілю робочої частини недостатньо автоматизований. Наявне обладнання: верстати, що працюють абразивним кругом, абразивними стрічками, електрофізичні верстати головним чином призначені для шліфування лопаток малих розмірів.



Розмітка



Фрезерування робочої частини



Фрезерування галтелів у хвоста і бандажа



Шліфування робочої частини



Фрезерування профілю хвоста



Фрезерування профілю бандажа



Свердління отворів під бандажний зв'язок



Полірування робочої частини

Рисунок 5 - Операції нового технологічного процесу



Рисунок 6 - Складання ряду на технологічному диску

У пристроях для фінішної обробки профілю лопаток, що працюють абразивами, використовуються копії і елементи зв'язку інструменту ріжучого з копіром. Це істотно ускладнює конструкцію, знижує її надійність. У роботі пропонується конструктивна схема пристрою для полірування робочих криволінійних поверхонь лопаток бескопирним способом, побудована на основі гіроскопа з однією точкою опори, в якому інерціальні сили, що виникають при обертанні шпинделя з кругом, забезпечують притиснення круга до поверхні і тим самим сприяє зніманню металу і в підсумку досягнення потрібної якості профілю (рис.7).

Робота пристрою базується на гіроскопічних властивостях швидко-обертаючих тіл. Основними складальними одиницями його є: вузол закріплення полірованої лопатки 1 і робочий орган, який несе на собі інструмент - полірувальний круг 2. Пристрій працює наступним чином: в початковому положенні полірувальний круг не обертається і робочий орган відводиться за допомогою рукоятки, наприклад, на деякий кут від вертикальної осі. Оператор закріплює лопатку за хвіст в спеціальному пристосованні і включає приводи обертання і осьового руху лопатки (на схемі

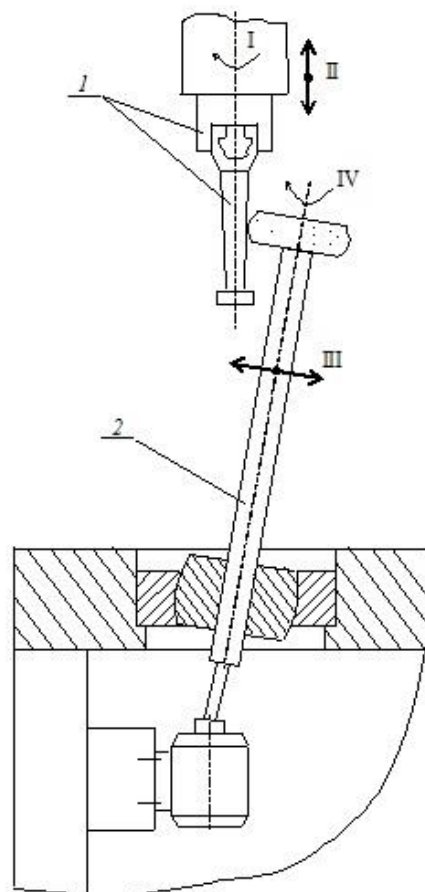


Рисунок 7 -. Схема пристрою для полірування лопаток

пристосованні і включає приводи обертання і осьового руху лопатки (на схемі

руху I і II). Далі робочий орган за допомогою рукоятки підводять до рухається лопатці (рух III) і потім шпинделя робочого органу повідомляють швидке обертання (рух IV).

При обертанні робочого гіроскопа з однією точкою опори, вісь обертання буде зберігати своє становище щодо базових поверхонь пристрою. З практичних позицій важливо визначити режимні та конструктивні параметри, при яких ця властивість буде проявлятися. До режимних параметрів відноситься частота обертання полірувального круга, до конструктивних - маса круга і маса шпинделя, на якому круг кріпиться. Обидві маси визначають положення центра ваги робочого органу, що істотно впливає на стійкість його положення.

Для конструкції, коли центр тяжіння знаходиться вище опори, отримано рівняння для розрахунку критичного значення частоти обертання диска $\omega_{кр}$ у вигляді

$$\omega_{кр} = 2 \sqrt{\frac{\left(\frac{m_{np}}{4} \left(\frac{1}{3} H^2 + R_{кр}^2 \right) + m_{np} \ell^2 \right) m_{np} g \ell}{\left(\frac{m_{np} R_{кр}^2}{2} \right)^2}} = 4 \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{4} \left(\frac{1}{3} H^2 + R_{кр}^2 \right) + \ell^2 \right) g \ell}{R_{кр}^4}}$$

Розрахунки виконані для конкретних розмірів робочого органу пристрою, призначеного для полірування лопаток середнього типорозміру. прийнято:

$$R_{кр} = 10 \text{ см}, \quad \ell = 40 \text{ см}, \quad H = 2 \text{ см}, \quad g = 980 \text{ см/с}^2.$$

$$\omega_{кр} = 4 \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{4} \left(\frac{1}{3} 2^2 + 10^2 \right) + 40^2 \right) 980 \cdot 40}{10^4}} = 319,28 \text{ рад/с}$$

$$\text{Частота обертання круга складе: } n = \frac{\omega_{кр}}{2\pi} = \frac{319,28}{2\pi} = 50,8 \text{ с}^{-1}$$

Для забезпечення обертання необхідний електродвигун з $n_{зв} = 3048 \text{ мин}^{-1}$.

У четвертому розділі виконано дослідження операції шліфування титанового сплаву.

Основна причина поганої оброблюваності шліфуванням сплавів на основі титану пояснюється високою адгезійною активністю металу до абразивного матеріалу. Саме адгезійна активність титану і сплавів на його основі є причиною інтенсивного зносу абразивного інструменту, великої сили різання і шорсткості обробленої поверхні. При шліфуванні час взаємодії пари абразив-метал істотно вище, що збільшує негативний вплив адгезійної взаємодії на показники процесу. Використання спеціального абразивного інструменту, оптимізація режимів обробки і постійна правка круга дозволяють знизити інтенсивність контактних процесів при шліфуванні.

Порівняльні технологічні випробування виконували на

експериментальній установці, змонтованій на базі плоскошлифовального верстата мод. 3E711ВФ2. Для вимірювання сили притиску і середньої контактної температури використовували автоматизоване робоче місце, яке включає напівштучну термопару для вимірювання середньої контактної температури, закріплену в універсальному динамометрі УДМ-100. УДМ-100 встановлюють на столі верстата. Термопара и УДМ-100 підключені за допомогою інтерфейсного кабелю до вісьмиканального вимірювального підсилювача, з'єднаному з допомогою кабелю з вісьмиканальним аналого-цифровим перетворювачем, який безпосередньо підключається до персонального комп'ютера, що задовольняє вимогам операційної системи Windows XP з використанням спеціальної програми.

Застосовували схему плоского шліфування периферією круга, яка здійснювалася кругами прямого профілю ПП-200×40×32 виробництва АТ "ТУРБОАТОМ" (СТП 880- 2017) на керамічній зв'язці К5 з зернами з електрокорунду нормального марки 15А, діапазоном зернистості 32 мкм, 16 мкм і 8 мкм, і номерів структури – 4 ($V_z=54\%$), 9 ($V_z=44\%$), 14 ($V_z=34\%$). Перед випробуваннями шліфувальні круги перевіряли на відповідність їх основним геометричним параметрам і вимогам ГОСТ2424. Величина допустимого дисбалансу шліфувальних кругів не перевищувала значень, що визначаються ГОСТ3060 і ГОСТ19534. Твердість і механічна міцність кругів відповідали вимогам ГОСТ12.3.028. Твердість контролювали акустичним методом за допомогою приладу «Звук-203М», механічну міцність кіл визначали на стенді «СИП-800». Перед установкою на випробувальний стенд всі круги перевіряли на наявність сколів і тріщин. В процесі порівняльних випробувань проводили статичну балансування шліфувальних кругів на стенді. Шліфувальні круги попередньо правилися і припрацьовувалися протягом 2-3 хвилин. Після випробувань діаметр шліфувального круга контролювали мікрометрів МК200 (ГОСТ4381, ціна поділки 0,01 мм, діапазон виміру 175 ... 200 мм, похибка вимірювання $\pm 0,002$ мм).

Обробка проводилась з дотриманням наступних параметрів: сила притиску в межах 25, 35, 45 Н, швидкість кола в межах 25, 35, 45 м/с.

Дослідження проводили на зразках з матеріалу - титанового сплаву ВТ3-1 з межею міцності $\sigma_b=930$ МПа. Зразки для проведення випробувань виготовляли з однієї партії матеріалів, які відповідали вимогам стандартів за хімічним складом і фізико-механічними властивостями. Розсіювання межі міцності зразків не перевищувала + 3,5 %. Перед початком кожної серії дослідів партію заготовок вишлифовали в один розмір з допуском по 7 квалітету і шорсткістю по параметру $R_a < 1,6$ мкм. Відхилення шорсткості поверхні в партії зразків не перевищувала 8 ... 10%. Розміри зразків відповідали розмірам 100×80×15 мм.

Стан рельєфу обробленої поверхності досліджували на растровому двопробневому електронному мікроскопі Versa 3D LoVac.

Середнє арифметичне відхилення профілю шліфованої поверхні R_a і інші параметри шорсткості вимірювали на профілометри SURTRONIC 3+ фірми TAYLOR – HOBSON.

Для наочної інтерпретації результатів вимірювань знімалися відповідні профілограми досліджуваних об'єктів; вони були отримані за допомогою універсальної вимірювальної станції HOMMELWERKE T8000.

Для оцінки оптимальності процесу при плоскому шліфуванні периферією круга використовували параметри:

1. Продуктивність обробки – Q (мм³/мин),
2. Відносна витрата шліфувального круга – q (мг/г),
3. Питома собівартість обробки – C (грн/см³),
4. Шорсткість обробленої поверхні – Ra (мкм),
5. Контактна температура різання – T (°C).

Оптимальність процесу шліфування визначалася із застосуванням методики багатофакторного планування експериментів, що дозволяє описати процес у вигляді рівнянь регресії. З огляду на те, що основним параметром оптимізації була питома собівартість обробки, визначалася область факторного простору з мінімальним її значенням. При цьому обмеження умов шліфування проводилося за якісними показниками процесу - шорсткості обробленої поверхні і контактної температурі. Тому інтервали варіювання факторів вибиралися в діапазоні умов шліфування, що забезпечують найменшу питому собівартість обробки і найкращі показники обробленої поверхні.

Дослідження факторного простору, прилеглого до оптимуму, проводилося за допомогою планування другого порядку, так як лінійне рівняння регресії не може адекватно описувати поверхню відгуку через крутизні гіперплоскостей факторного простору і можливої значущості ефектів взаємодії чинників і квадратичних ефектів. Перевагу було віддано плану, близькому до Д-оптимального і позначеному в літературі як В4 для 4-х чинників: сила притиску, швидкості різання, зернистості і № структури круга (об'єм зерен V_3 , %).

Для аналізу впливу окремих факторів на показники працездатності кругів будувалися однофакторні залежності (розрахунок канонічних перетворень і однофакторні залежності були отримані за програмою MS Excel). Значення факторів, рівнів і інтервалів їх варіювання для планованого експерименту другого порядку за планом (В4), близькому до Д-оптимального, приведено в табл.1. Матриця планування і результати експериментів наведені в табл.2.

Таблиця 1 - Позначення факторів, рівнів і інтервалів їх варіювання

Фактори	$Pc.np$, Н	V , м/с	Z , мкм	структура круга № (V_3 , %)
Умовне позначення факторів	x_1	x_2	x_3	x_4
Нульовий рівень (0)	35	35	20	9 (44)
Верхній рівень (+)	45	45	32	4 (54)
Нижній рівень (-)	25	25	8	14 (34)
Інтервал варіювання	10	10	12	5 (10)

Після розрахунків коефіцієнтів отримані наступні рівняння регресії.

1. Для продуктивності

$$y_Q = 640,22 + 116,19x_1 + 74,52x_2 - 103,01x_3 + 99,70x_4 + 20,46x_1x_2 + \\ + 16,60x_1x_3 + 17,34x_1x_4 - 44,90x_2x_3 + 31,74x_2x_4 - 77,37x_3x_4 - \\ - 34,66x_1^2 - 131,79x_2^2 + 36,86x_3^2 + 88,89x_4^2. \quad (1)$$

2. Для відносної витрати шліфувального круга

$$y_q = 7,65 - 2,91x_1 - 1,99x_2 + 0,27x_3 + 3,19x_4 + 0,72x_1x_2 - \\ - 0,58x_1x_3 - 1,58x_1x_4 - 0,57x_2x_3 - 1,06x_2x_4 - 2,38x_3x_4 - \\ - 3,05x_1^2 - 0,18x_2^2 + 1,58x_3^2 + 2,58x_4^2. \quad (2)$$

3. Для питомої собівартості обробки

$$y_C = 594,71 - 229,31x_1 - 132,57x_2 + 59,99x_3 - 21,41x_4 + 52,46x_1x_2 - \\ - 39,17x_1x_3 - 8,08x_1x_4 - 36,67x_2x_3 - 12,42x_2x_4 - 183,54x_3x_4 - \\ - 51,28x_1^2 + 88,38x_2^2 + 138,22x_3^2 - 19,62x_4^2. \quad (3)$$

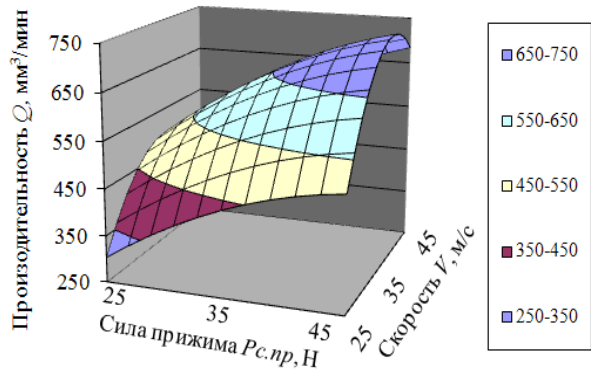
4. Для шорсткості обробленої поверхні

$$y_{Ra} = 0,848 + 0,103x_1 - 0,084x_2 + 0,146x_3 - 0,118x_4 - 0,003x_1x_2 + \\ + 0,030x_1x_3 + 0,030x_1x_4 - 0,015x_2x_3 - 0,034x_2x_4 + 0,061x_3x_4 + \\ + 0,006x_1^2 + 0,079x_2^2 + 0,054x_3^2 + 0,233x_4^2. \quad (4)$$

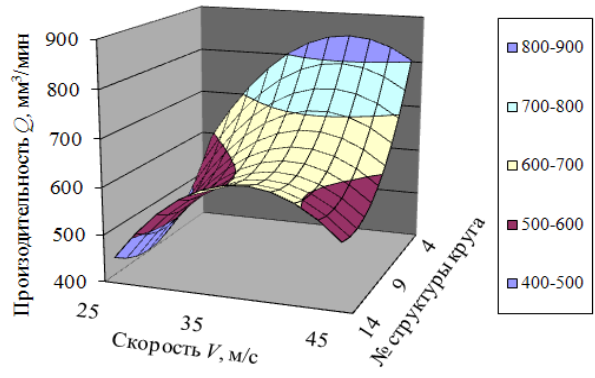
5. Для контактної температури різання

$$y_T = 768,46 + 133,97x_1 + 67,01x_2 - 104,36x_3 + 115,68x_4 + 15,68x_1x_2 - \\ - 10,38x_1x_3 + 8,79x_1x_4 - 47,23x_2x_3 + 25,67x_2x_4 - 81,29x_3x_4 - \\ - 48,04x_1^2 - 172,04x_2^2 + 61,13x_3^2 + 100,63x_4^2. \quad (5)$$

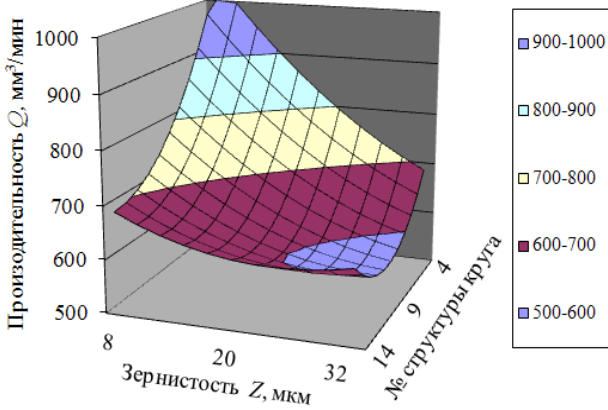
Отримано тривимірні поверхні відгуку, що дозволяють здійснювати вибір оптимальних режимних параметрів шліфування для забезпечення продуктивності обробки (рис.8), відносної витрати шліфувального круга (рис.9) і питомої собівартості обробки (рис.10). На рис.11 наведені тривимірні поверхні відгуку, що дозволяють здійснювати вибір режимних параметрів шліфування і характеристик абразивних кругів для оптимізації шорсткості обробки і контактної температури.



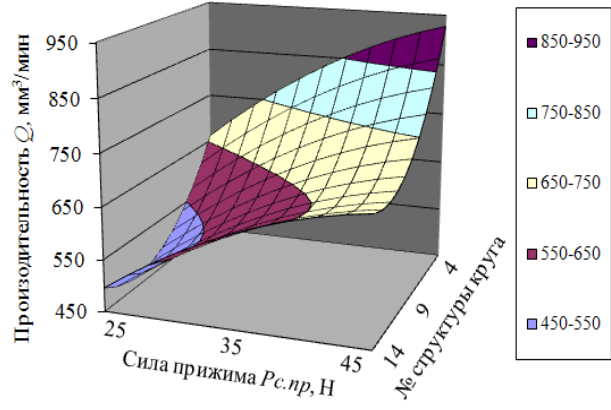
$Q - f(P_{с.пр}, V): Z=20\text{мкм}; \text{№}9$



$Q - f(V, \text{№}): P_{с.пр}=35\text{Н}; Z=20\text{мкм}$

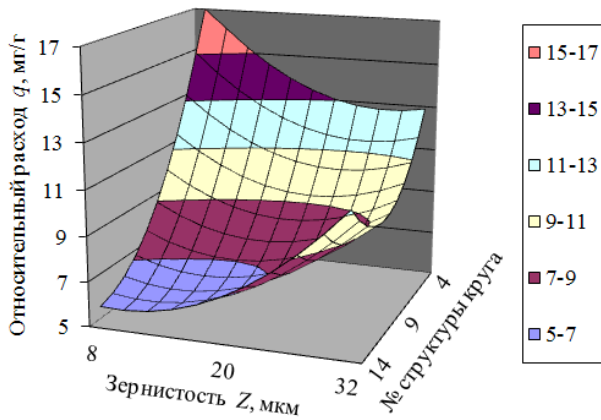


$Q - f(Z, \text{№}): P_{с.пр}=35\text{Н}; V=35\text{м/с}$

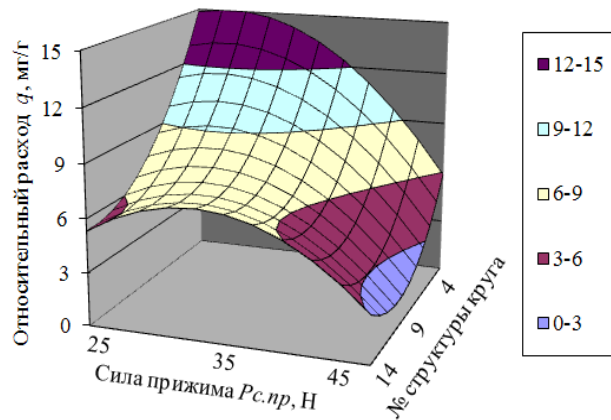


$Q - f(P_{с.пр}, \text{№}): Z=20\text{мкм}; V=35\text{м/с}$

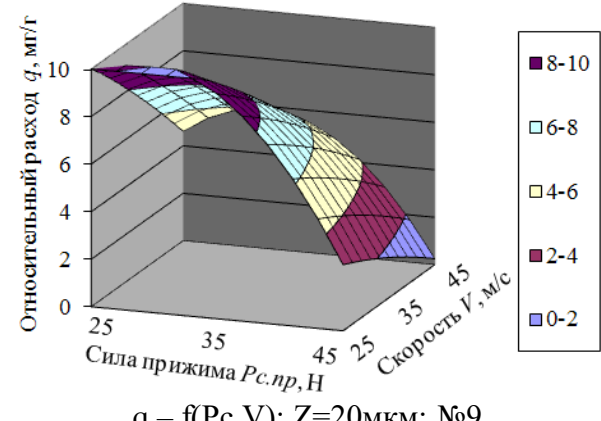
Рисунок 8 - Поверхні відгуку для продуктивності обробки



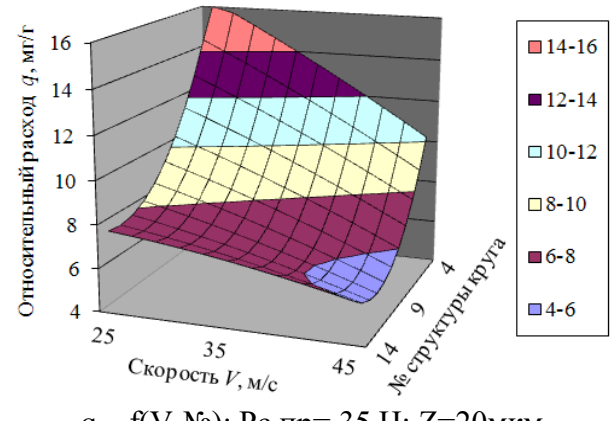
$q - f(Z, \text{№}): P_{с.пр}=35\text{Н}; V=35\text{м/с}$



$q - f(P_{с.пр}, \text{№}): Z=20\text{мкм}; V=35\text{м/с}$



$q - f(P_{с.пр}, V): Z=20\text{мкм}; \text{№}9$



$q - f(V, \text{№}): P_{с.пр}=35\text{Н}; Z=20\text{мкм}$

Рисунок 9 - Поверхні відгуку для відносної витрати шліфувального круга

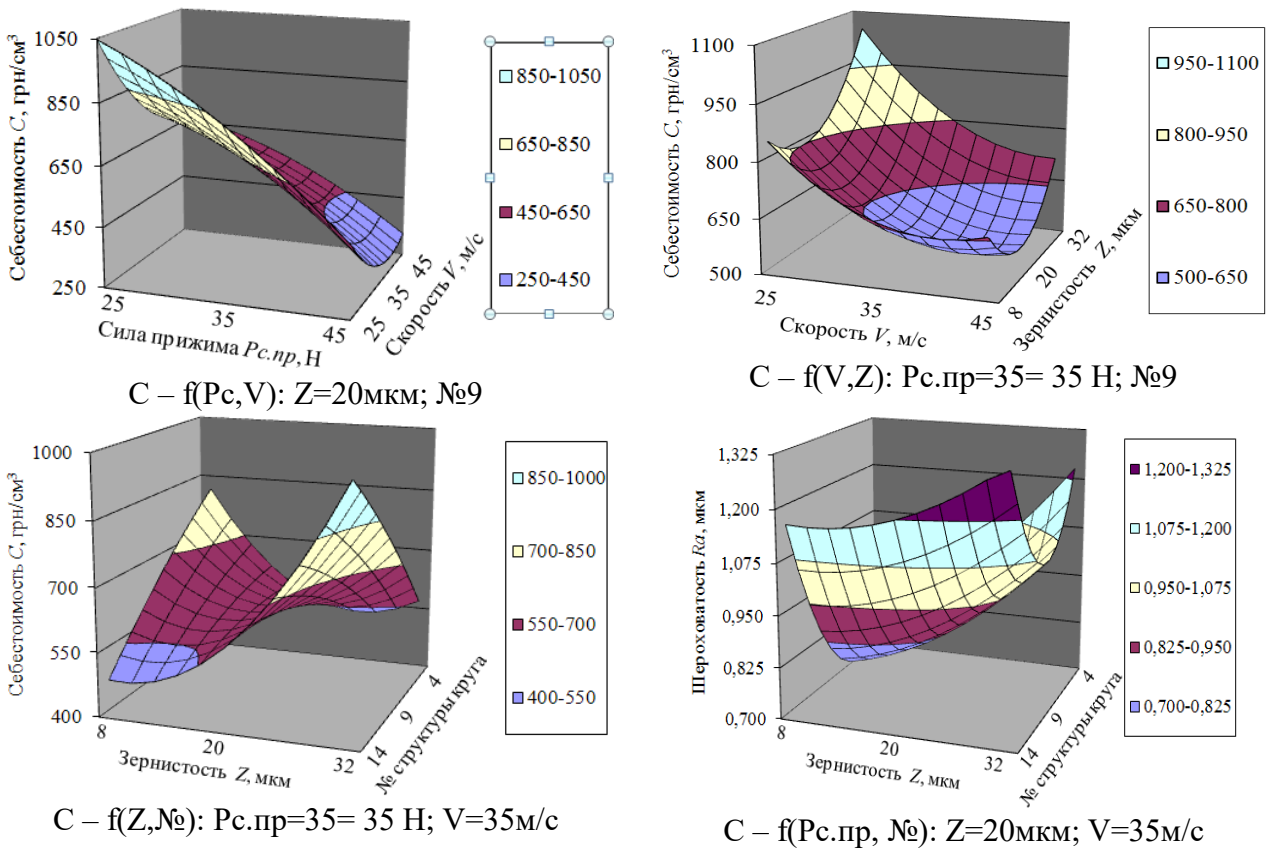


Рисунок 10 - Поверхні відгуку для питомої собівартості обробки

Оцінка значущості коефіцієнтів рівнянь регресії і характер розташування ліній рівного відгуку показують, що режими шліфування та характеристики абразивних кругів в досліджуваному діапазоні істотно впливають на шорсткість поверхні і контактну температуру.

Збільшення продуктивності можливо тим більше, чим твердіше шліфувальний круг, що можна пояснити підвищенням так званої динамічної твердості інструмента, зумовленої зменшенням навантаження на ріжучі абразивні зерна при збільшенні його швидкості обертання. Рекомендується застосовувати для високопродуктивного шліфування титанових сплавів без використання мастильно-охолоджуючих засобів високоструктурний абразивні круги на керамічних зв'язках, у яких щільність і твердість повинні відповідати певному швидкісного режиму.

В п'ятому розділі для оцінки та порівняння трудомісткості виготовлення, рівня раціональності структури базового і нового технологічних процесів виконано їх моделювання з використанням програмного комплексу імітаційного моделювання «СІМ», розробленого в НТУ «ХПІ».

Розроблені раніше маршрути обробки деталей в системі «СІМ» можна реалізувати на обраному технологічному обладнанні розміщеному уздовж будь-яких схем потокового і непотокового виробництва. Введення вихідних даних про техпроцес (послідовність і тривалість технологічних операцій, обладнанні (складське, транспортне, технологічне, контрольно-вимірювальне, партії запуску і транспортному шляху переміщення деталей дозволяє в підсумку отримати модель планування ділянки.

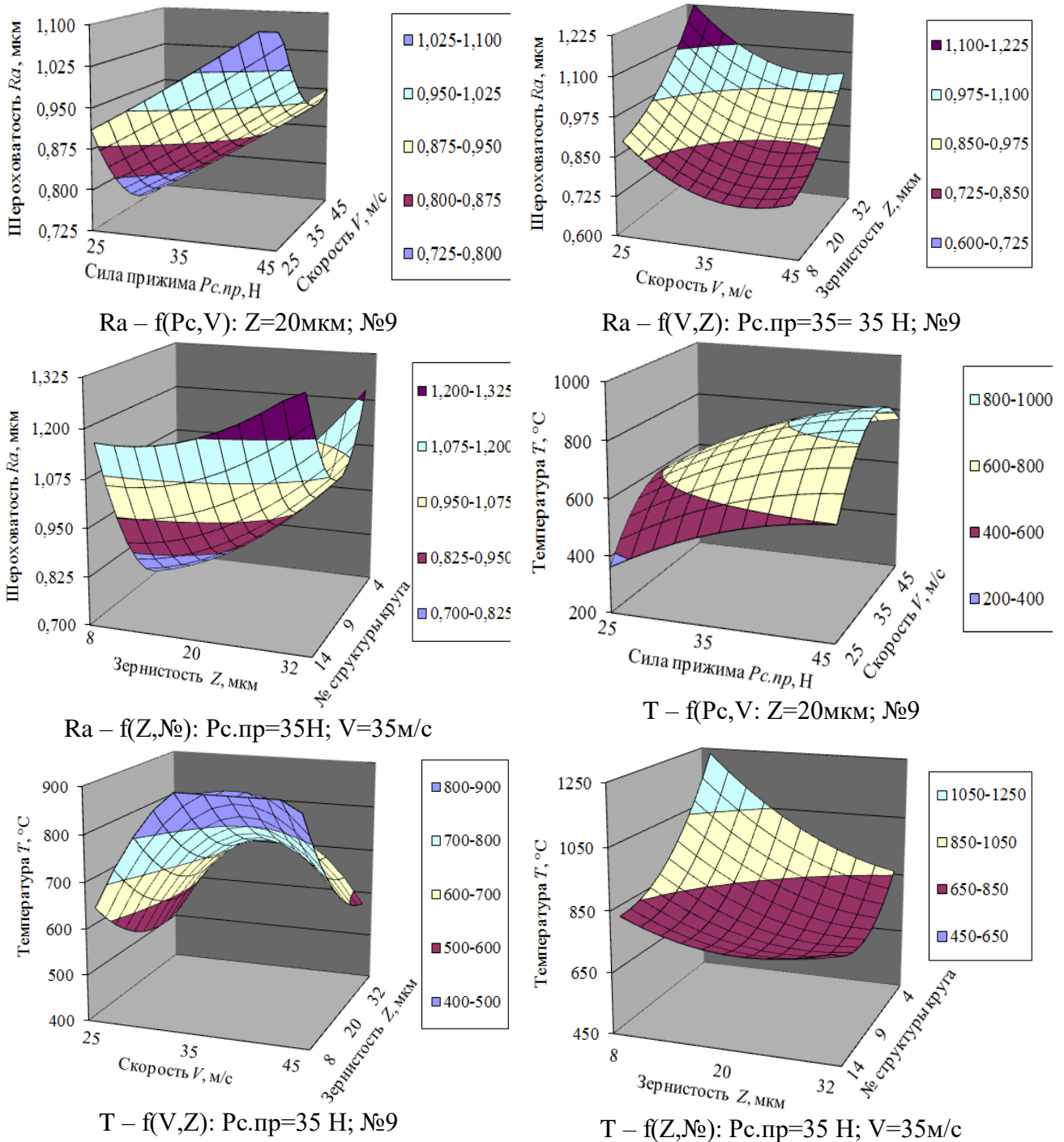


Рисунок 11 - Поверхні відгуку для шорсткості обробки і контактної температури

Розмір абразивних зерен в шліфувальному крузі визначається вимогами до продуктивності процесу і шорсткості обробленої поверхні деталі. На конструкцію високоструктурного абразивного інструменту, який дозволяє управляти експлуатаційними властивостями інструмента з підвищеними структурою і пористістю за рахунок вмісту порошоків окислів металів та алюмосилікатних мікросфер, отримано патент на корисну модель №128773 UA.

На рис.12 показана діаграма Ганта роботи ділянки обробки лопаток для програм запуску 10 шт.

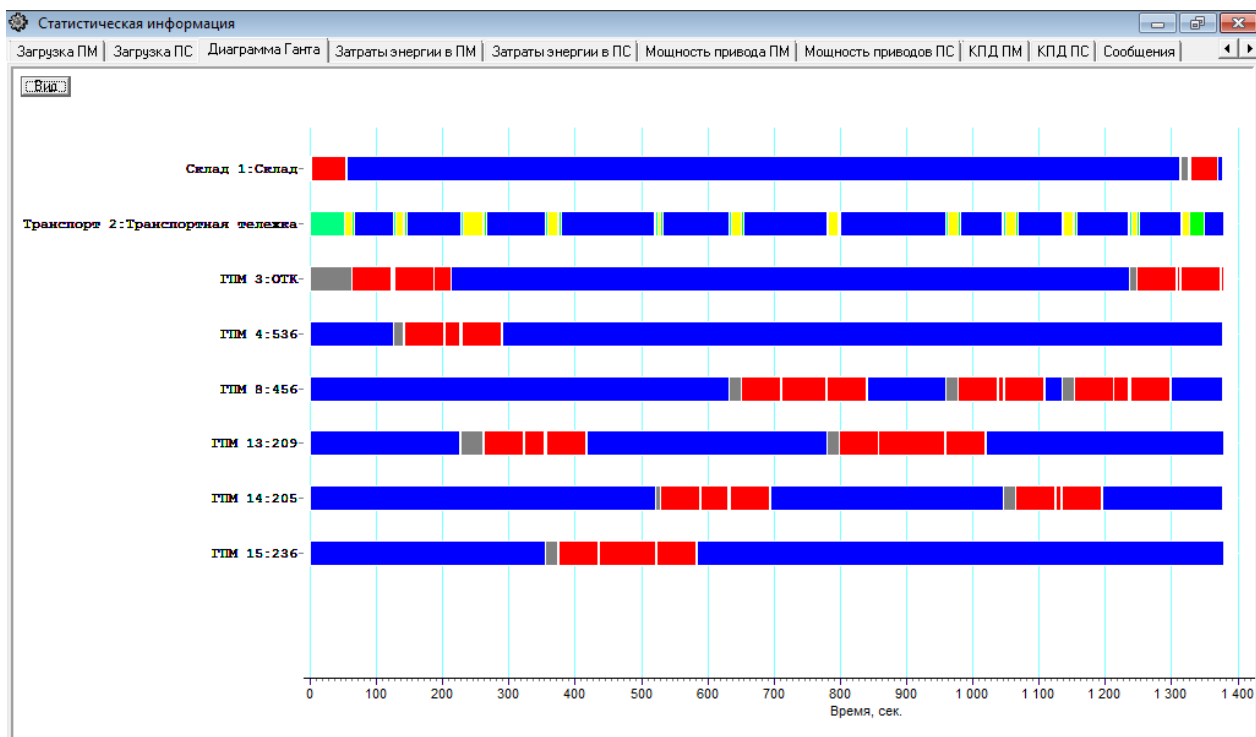


Рисунок 12 – Діаграма Ганта (програма запуску 10 шт)

Аналіз результатів імітаційного моделювання роботи виробничої дільниці з виготовлення турбінних лопаток при реалізації базового і нового технологічних процесів при різних програмах запуску показав (табл.2), що трудомісткість виготовлення титанової лопатки в порівнянні зі сталеву знизена на 30%, а цикл виробництва всього ряду (комплект 100 лопаток) знижується в два рази.

Таблиця 2 - Порівняння варіантів технологічних процесів

	Базовий	Новий
<i>T_{шт.}</i> , (н/ч)	104,5	72,9
Цикл виробництва партії 10 шт, (год/дів)	570/24	410/17
Цикл виробництва партії 100 шт, (год/дів)	2480/103	1290/54

В рамках розв'язуваної задачі забезпечення якості та зниження трудомісткості виготовлення складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів виконувалась модернізація технологічного обладнання. В порядку організаційної підтримки чинної програми технічного розвитку, що передбачала модернізацію виробництва в усіх напрямках, на підприємстві проведено реорганізацію ремонтної служби з подоланням її децентралізації та посиленням акценту від підтримуючого працездатність поточного ремонту верстатного обладнання до капітального ремонту і розширення технологічних можливостей при модернізації. Так, в лопатковому виробництві виконана модернізація верстатів для кругової обробки лопаток парових турбін з установкою систем ЧПК (рис.13).

Фактори, що забезпечують ефект від проведеної модернізації верстатів:

- зменшено кількість операцій пов'язаних з переустановленням лопатки на 90%, що дозволило відмовитися від металоємної установчої оснастки;

- на модернізованому верстаті ІС-800ПМФ4 отримана можливість фрезерування хвоста титанової лопатки фасонною фрезою нової конструкції замість точіння хвоста по базовій технології в спеціальному металоємкому пристосуванні;



Рисунок 13 – Обробка турбінних лопаток на модернізованих верстатах моделі ІС-800ПМФ4 и фірми «Форест»

- відмова від проектування, виготовлення і використання фізичних копій, що дозволило скоротити цикли підготовки виробництва з 5-ти місяців до 2-х і зменшити кількість дорогої оснастки.

- обробка профілю лопаток по керуючій програмі дозволила фрезерувати лопатки з максимальним наближенням до теоретичного профілю.

За результатами досліджень фінішних операцій обробки титанових лопаток надано технологічні рекомендації щодо забезпечення полірувальних операцій, в першу чергу по виключенню прижогів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача забезпечення якості та зниження трудомісткості обробки сложнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів.

1. На основі системного аналізу проблеми забезпечення якості виготовлення деталей з важкооброблюваних матеріалів в турбінобудуванні встановлено, що існують всі можливості вдосконалення реалізованого на заводі базового технологічного процесу обробки і формування раціональної структури нового щодо забезпечення якості та зниження трудомісткості обробки сложнопрофільних поверхонь лопаток з титанових сплавів.

2. На відміну від базового технологічного процесу обробки сталевих лопаток в новому змінена черговість обробки хвоста і робочої частини, що дало

кілька позитивних ефектів. Відмова від фізичної моделі (еталонної деталі-копіра з точністю 0,10 мм) на копіювально-фрезерних операціях базового техпроцесу з переходом до комп'ютерної моделі (з точністю 0,010 мм) і обробці на верстатах з ЧПУ нового техпроцесу дозволив істотно скоротити трудомісткість технологічної підготовки виробництва і забезпечити якість обробки.

3. Зміна черговості обробки частин лопатки зажадало впровадження нових методів і засобів контрольних операцій технологічного процесу. При відмові від попередньої обробки хвоста лопатки і використанні його в якості технологічної бази для подальшої обробки запропоновано новий підхід до забезпечення сталості знімається припуску складнопрофільних поверхонь робочої частини і його мінімізації шляхом впровадження операції розмітки заготовки з використанням вимірювальної "руки" FARO PRIME 1,2.

4. Із застосуванням методики багатофакторного планування експериментів проведено дослідження фінішної операції шліфування поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів, що дозволило розробити рекомендації щодо вибору оптимальних режимів різання, які забезпечують необхідну якість і стабільність методу обробки. Рекомендовано застосовувати для високопродуктивного шліфування титанових сплавів без використання мастильно-охолоджуючих засобів високоструктурні абразивні круги на керамічних зв'язках. На високоструктурний абразивний інструмент, який дозволяє управляти експлуатаційними властивостями інструмента з підвищеними структурою і пористістю за рахунок вмісту порошків окислів металів та алюмосилікатних мікросфер, отримано патент України на корисну модель №128773.

5. У процесі досліджень були надані рекомендації та виконано модернізацію технологічного обладнання. Так 4-х шпindelьні фрезерно-копіювальні верстати "Forest" оснащені системами ЧПУ, в результаті час переналагодження скорочено з 3-5 місяців до 10 днів. Операція обробки галтелів у хвоста і бандажа, яка раніше виконувалася вручну, реалізована на модернізованому вертикально-фрезерному верстаті з ЧПУ 65A90 шляхом додавання координати (обертання деталі в спеціальному пристосуванні). Аналогічно модернізовано верстат «Метабо» для шліфування робочої частини лопатки. Для фрезерування профілю хвоста і бандажа модернізації піддано модуль гнучкий спеціальний IC-800 і впроваджено новий ріжучий інструмент.

6. Розроблені практичні рекомендації та результати теоретичних і експериментальних досліджень щодо забезпечення якості та зниження трудомісткості обробки впроваджені на АТ «ТУРБОАТОМ» (м.Харків) при розробці нового технологічного процесу обробки турбінних лопаток з титанових сплавів. Це дозволило знизити трудомісткість виготовлення лопатки на 30%, скоротити цикл виробництва комплекту (100 штук) для одного ряду турбіни в два рази. Впровадження операції зборки ряду на новому спеціальному пристосуванні (технологічному диску) в заводських умовах із загальною трудомісткістю 8 годин дозволяє скоротити час монтажу ряду на станції з двох тижнів до двох діб.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ, ЯКІ ОПУБЛІКОВАНО ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ищенко Г.И. Исследование точности фрезерования профиля лопаток паровых турбин. /Н.В.Емец, Г.И.Ищенко, М.Г.Ищенко //Машинобудування : зб. наук. пр. – Харків: Укр. інж.-пед. акад. – 2010. – Вип. 6. – С.97–106.

Здобувач провів аналіз точності фрезерування профілю лопаток турбін.

2. Ищенко Г.И. Перспективные направления совершенствования и дальнейшего развития высоких технологий в машиностроении / Г.И.Ищенко, И.К.Кириченко, А.Я.Мовшович, Н.К. Резниченко //Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Технологии в машиностроении. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2010. – № 40. – С. 34-42.

Здобувач провів аналіз перспективних напрямків вдосконалення і розвитку високих технологій в машинобудуванні.

3. Ищенко Г.И. К вопросу о работоспособности лезвийного инструмента с покрытиями /Г.И.Ищенко, В.П.Зубарь, М.В.Чопенко //Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2012. – Вып. 82. – С. 71-74.

Здобувач провів аналіз працездатності лезвийного інструменту з покриттями у виробничих умовах.

4. Ищенко Г.И. Надежность системы универсально–сборочных приспособлений. Критерии надежности /А.Я.Мовшович, Г.И.Ищенко, М.Г.Ищенко //Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - 2013. - Вып. 59. - С. 147-152.

Здобувач провів аналіз надійності системи УСП у виробничих умовах.

5. Ищенко Г.И. Изучение возможностей использования метода структурной инженерии многослойных периодических систем для повышения механических свойств покрытий, применяемых в качестве защитных на деталях паротурбинных агрегатов /О. В.Соболь, В. В.Дмитрик, Г.И.Ищенко и др. //Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2015. – Вып.3/1(75). – С.50-56.

Здобувач провів аналіз переваг використання багатощарових захисних покриттів на деталях паротурбінних агрегатів у виробничих умовах.

6. Ищенко Г.И. К вопросу о имитационном моделировании машинно-ручных технологических операций в системах обработки металлов резанием /Г.И.Ищенко, А.Р.Рузметов, М.С.Семченко, А.Н.Шелковой, Л.Б.Шрон //Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПИ", 2015. – Вип. 10. – С. 177-191.

Здобувачем виконано імітаційне моделювання машинно-ручних технологічних операцій для виробничих ділянок.

7. Ищенко Г.И. Технологические возможности ПАО «Турбоатом» /Г.И.Ищенко, М.Г.Ищенко //Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПИ", 2015. – Вип. 1 (25). – С.3-17.

Здобувач виконав аналіз виробничих можливостей заводу.

8. Ищенко Г.И. Определение особенностей и рациональных условий шлифования лопаток турбин из титанового сплава //Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – вип. 1(27). – С. 3-9.

9. Ищенко Г.И. Технологическое обеспечение изготовления гидравлической турбины для Днестровской ГАЭС /Г.И.Ищенко, М.Г.Ищенко, А.В. Линник. Е.И.Сокол. А.Ю.Черкасский // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 26 (1248). – С. 5–13.

Здобувач виконав аналіз методів та засобів технологічного забезпечення виготовлення гідравлічної турбіни.

10. Ищенко Г.И. О финишной обработке рабочей части лопаток паровых турбин /Г.И.Ищенко, Р.М.Стрельчук //Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. - Харків: НТУ «ХП». -2018. - № 6 (1282). - С.119-126.

Здобувачем представлені результати аналізу фінішної обробки робочої частини лопаток парових турбін.

11. Ищенко Г.И. Исследование эрозии поверхностного слоя лопаточной стали 15X11МФ при микроударном воздействии / В.А.Белоус, Г.И.Ищенко, М.Г.Ищенко и др. //Вопросы атомной науки и техники. — 2018. — № 2. — С. 119-124.

Здобувач провів аналіз ерозії поверхневого шару лопаток у виробничих умовах.

12. Ищенко Г.И. Целевые функции представительства семейств критерий оптимизации блочно–модульного инструмента на тяжелых станках /Г.П.Клименко, Е.В.Мироненко, Г.И.Ищенко и др. //Вісник Національного технічного університету "ХП". Сер. : Технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХП", 2020. – № 2. – С.57-64.

Здобувач провів аналіз умов використання блочно–модульного інструменту у виробничих умовах.

13. Ищенко Г.И. Обработка великогабаритных деталей турбоагрегатів з використанням портативних верстатів / А.А.Пермяков, Г.И. Ищенко, М.Г.Ищенко //Modern engineering and innovative technologies, Germany. – Вип.15. – 2021. – С.17-26. (ISSN 2567-5273)

Здобувач провів аналіз технологічності деталей турбоагрегатів при обробці портативними верстатами.

14. Високоструктурний абразивний інструмент. Патент №128773 UA, МПК В24D 3/14 (2006.01) /Г.И. Ищенко, Р.М. Стрельчук. - № u201803103; заявл. 26.03.2018; опубл. 10.10.2018. Бюл. № 19.

Здобувачем запропоновано конструктивні варіанти високоструктурного абразивного інструменту в якому наповнювач додатково містить компоненти з алюмосилікатних мікросфер та порошків окислів металів.

15. Ищенко Г.И. «Турбоатом» - производство продукции, проблемы, достижения //Материалы XIX международного научно-технического семинара «Высокие технологии: тенденции развития, нормативно-техническое регулирование «Интерпартнер-2011», 12-17 вересня 2011 р., м.Алушта - Харків: НТУ «ХП», 2011. – С.47-48.

16. Ищенко Г.И. Технологические возможности ПАО «Турбоатом» //Г.И.Ищенко, М.Г.Ищенко //Материали XXIII міжнародного науково-технічного семінару «Високі технології: тенденції розвитку», 7-12 вересня 2015 р., м.Одеса. - Харків: Вид-во «Курсор», НТУ «ХПІ», 2015 – С.93-95.

Здобувач виконав аналіз виробничих можливостей заводу.

17. Ищенко Г.И. Статистичне дослідження точності фрезерування профілю лопаток парових турбін //Материали XXX міжнародної конференції «Нові технології в машинобудуванні», 3-8 вересня 2020 р., Коблево. - Харків: НАУ ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ», 2020. – С.94-95.

АНОТАЦІЇ

Ищенко Г.І. Технологічне забезпечення якості виготовлення сложнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021.

Дисертація присвячена рішенням актуальної задачі забезпечення якості та зниження трудомісткості обробки сложнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів.

На основі системного аналізу проблеми забезпечення якості виготовлення деталей з важкооброблюваних матеріалів в турбінобудуванні виконано вдосконалення існуючого базового технологічного процесу обробки лопаток з нержавіючої сталі і формування раціональної структури нового щодо обробки лопаток з титанових сплавів при забезпеченні якості та зниженні трудомісткості обробки. Відмова від фізичної моделі (еталонної деталі-копіра) на копіювально-фрезерних операціях базового техпроцесу з переходом до комп'ютерної моделі і обробці на верстатах з ЧПК нового техпроцесу дозволив істотно скоротити трудомісткість технологічної підготовки виробництва і забезпечити якість обробки. Для забезпечення сталості припуску, що знімається, сложнопрофільних поверхонь робочої частини і його мінімізації впроваджено сучасні методи і засоби контрольних операцій. Із застосуванням методики багатофакторного планування експериментів проведено дослідження фінішної операції шліфування поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів, що дозволило розробити рекомендації щодо вибору оптимальних режимів різання. У процесі досліджень були надані рекомендації та виконано модернізацію технологічного обладнання. Все це дозволило знизити трудомісткість виготовлення лопатки на 30%, скоротити цикл виробництва комплекту (100 штук) для одного ряду турбіни в два рази.

Ключові слова: технологічний процес, турбінна лопатка, сложнопрофільна поверхня, титановий сплав, забезпечення якості, трудомісткість обробки, шліфувальні і полірувальні операції.

Ищенко Г.И. Технологическое обеспечение качества изготовления сложнопрофильных поверхностей турбинных лопаток из титановых сплавов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 - технология машиностроения. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи обеспечения качества и снижения трудоемкости обработки сложнопрофильных поверхностей турбинных лопаток из титановых сплавов.

На основе системного анализа проблемы обеспечения качества изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов в турбиностроении выполнено совершенствование существующего базового технологического процесса обработки лопаток из нержавеющей стали и формирования рациональной структуры нового по обработке лопаток из титановых сплавов при обеспечении качества и снижении трудоемкости обработки. Отказ от физической модели (эталонной детали-копира) на копировально-фрезерных операциях базового техпроцесса с переходом к компьютерной модели и обработке на станках с ЧПУ нового техпроцесса позволил существенно сократить трудоемкость технологической подготовки производства и обеспечить качество обработки. Для обеспечения постоянства снимаемого припуска сложнопрофильных поверхностей рабочей части и его минимизации внедрены современные методы и средства контрольных операций. С применением методики многофакторного планирования экспериментов проведено исследование финишной операции шлифования поверхностей турбинных лопаток из титановых сплавов, что позволило разработать рекомендации по выбору оптимальных режимов резания. В процессе исследований были даны рекомендации и выполнена модернизация технологического оборудования. Все это позволило снизить трудоемкость изготовления лопатки на 30%, сократить цикл производства комплекта (100 штук) для одного ряда турбины в два раза.

Ключевые слова: технологический процесс, турбинная лопатка, сложнопрофильная поверхность, титановый сплав, обеспечение качества, трудоемкость обработки, шлифовальные и полировальные операции.

Ishchenko G.I. Technological assurance of the quality of manufacturing of complex-profile surfaces of turbine blades from titanium alloys. – As a manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.02.08 - mechanical engineering technology. - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to solving the urgent problem of quality assurance and reducing the labor intensity of processing complex-profile surfaces of turbine blades made of titanium alloys.

On the basis of a systematic analysis of the problem of ensuring the quality of manufacturing parts from difficult-to-machine materials in turbine engineering, the basic technological process of processing stainless steel blades implemented was improved and a rational structure was formed for a new one for processing blades from titanium alloys while ensuring quality and reducing the labor intensity of processing. The rejection of the physical model (reference copier part) for copy-milling operations of the basic technical process with the transition to a computer model and processing on CNC machines of the new technical process made it possible to significantly reduce the labor intensity of technological preparation of production and ensure the quality of processing. To ensure the constancy of the removed allowance of the complex-profile surfaces of the working part and to minimize it, modern methods and means of control operations have been introduced. Using the method of multifactorial planning of experiments, the study of the finishing operation of grinding the surfaces of turbine blades made of titanium alloys was carried out, which made it possible to develop recommendations for choosing the optimal cutting conditions. In the process of research, recommendations were given and the modernization of technological equipment was carried out. All this made it possible to reduce the labor intensity of manufacturing a blade by 30%, to reduce the production cycle of a set (100 pieces) for one row of a turbine by half..

Key words: technological process, turbine blade, complex-profile surface, titanium alloy, quality assurance, labor intensity of processing, grinding and polishing operations.



Підписано до друку 24.03.2021 р. Формат 60x90/16. Папір Сору
Рарер. Друк–ризографія. Гарнітура Таймс. Умов.друк.арк.0,9
. Обл.вид.арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. №21032501

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Містечтв, 3 літер Б-1
Тел.+38 067-91-93-922
www.modelist.in.ua

