

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 109 с., 23 табл., 39 рис., 1 дод., 25 джерел.

Ключові слова: ЛОПАТКА ТУРБІНИ, КОНСТРУКЦІЯ ЛОПАТКИ, ОБРОБКА ЛОПАТКИ, ФРЕЗЕРУВАННЯ, ПРОТЯГУВАННЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБРОБКИ, РЕЖИМИ РІЗАННЯ, ЛАСТІВЧИН ХВІСТ, ЖАРОМІЦНИЙ СПЛАВ, МАРШРУТ ОБРОБКИ.

Об'єкт дослідження – ефективність обробки лопаток турбін.

Метою проєкту є дослідження конструкції та методів обробки лопаток турбіни на підприємстві для розробки більш ефективного методу обробки лопаток, підвищуючи її продуктивність.

Завданням проєкту було розробка аналіз та оцінка більш ефективного методу обробки лопаток турбіни.

Задачами дипломного проєкту є:

- огляд та аналіз конструкції та особливостей лопаток авіаційних двигунів;
- огляд і аналіз методу обробки лопаток турбіни;
- формування та розробка більш ефективного методу обробки лопаток турбіни;
- аналіз та оцінка підвищення ефективності обробки розробленим методом.

Актуальність теми. Підвищення ефективності виробничих процесів є ключовим завданням сучасної авіаційної промисловості. Обробка лопаток турбіни — критичний етап виготовлення двигунів, який вимагає високої точності та якості. Використання більш ефективних методів обробки дозволяє знизити витрати часу, підвищити продуктивність та забезпечити стабільну якість обробки, що є важливим для задоволення сучасних вимог авіаційного виробництва.

ABSTRACT

Explanatory note to the master's thesis: 109 p., 23 tables, 39 figures, 1 appendix, 25 sources.

Keywords: TURBINE BLADE, BLADE DESIGN, BLADE MACHINING, MILLING, BROUGHT, MACHINING EFFICIENCY, CUTTING MODES, DOVETAIL, HEAT ALLOY, MACHINING ROUTE.

The object of the study is effective machining of turbine blades.

The purpose of the project is to study the design and methods of machining turbine blades at the enterprise in order to develop a more effective method of machining blades, increasing its productivity.

The task of the project was to develop, analyze and evaluate a more effective method of machining turbine blades.

The objectives of the diploma project are:

- review and analysis of the design and features of aircraft engine blades;
- review and analysis of the method of processing turbine blades;
- formation and development of a more effective method of processing turbine blades;
- analysis and evaluation of increasing the efficiency of processing by the developed method.

Relevance of the topic. Increasing the efficiency of production processes is a key task of the modern aviation industry. Processing of turbine blades is a critical stage of engine manufacturing, which requires high accuracy and quality. The use of more effective processing methods allows you to reduce time costs, increase productivity and ensure stable processing quality, which is important for meeting modern requirements of aviation production.

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	8
1 Загальна частина.....	10
1.1 Аналіз конструкції та особливостей лопаток авіаційних двигунів.....	10
1.2 Матеріали з яких виготовляють лопатки	22
1.3 Методи отримання заготовок для виробництва авіаційних лопаток.....	27
1.4 Вимоги до точності та якості обробки профілю лопаток.....	33
2 Літературний огляд і аналіз проблематики.....	36
2.1 Обробка хвостової частини лопатки на протяжних верстатах.....	36
2.2 Обробка профілю лопатки на фрезерних верстатах.....	41
3 Основна частина.....	49
3.1 Опис матеріалу заготовки лопатки турбіни.....	49
3.2 Отримання заготовки лопатки турбіни.....	50
3.3 Обробка хвостової частини лопатки протягуванням	53
3.4 Обробка профілю лопатки на вертикальному фрезерному верстаті з ЧПК.....	56
3.5 Розробка більш ефективного методу обробки лопатки турбіни.....	62
3.6 Розробка маршруту обробки на 5-ти координатному фрезерному верстаті	66
3.7 Аналітичний розрахунок режимів різання фрезерної обробки лопатки турбіни на 5-ти осьовому фрезерному верстаті з ЧПК.....	72
4 Аналіз та оцінка підвищення ефективності обробки.....	78
4.1 Визначення показників для оцінки та порівняння ефективності методів обробки.....	78

4.2 Технологічні показники обробки.....	79
4.3 Економічні показники.....	86
4.4 Організаційні показники.....	95
4.5 Висновки щодо аналізу та оцінки ефективності обробки.....	97
Висновок.....	100
Перелік джерел посилань.....	102
Додаток А Фрагмент коду керуючої програми обробки лопатки турбіни на 5-ти осьовому фрезерному верстаті з ЧПК MC 673 – 51.....	105

ВСТУП

Сучасний розвиток авіаційної промисловості висуває високі вимоги до ефективності виробничих процесів, зокрема до обробки деталей авіаційних двигунів. Одним із найважливіших компонентів таких двигунів є лопатки турбіни, які зазнають значних механічних і теплових навантажень під час роботи. Разом з тим, розвиток авіаційної галузі вимагає впровадження інноваційних технологій для підвищення якості обробки деталей при оптимізації витрат часу та ресурсів. Виготовлення лопаток турбіни вимагає точного дотримання геометричних параметрів і високої якості поверхонь.

На багатьох сучасних підприємствах обробка лопаток турбіни здійснюється з використанням декількох технологічних операцій на різних верстатах, що ускладнює процес і збільшує час виготовлення. Використання сучасних високоточних п'яти-осьових фрезерних верстатів з ЧПК дозволяє поєднати кілька операцій в одну, значно скоротивши час обробки та підвищивши її продуктивність.

Робота зосереджена на виявленню слабких місць в традиційних методах обробки лопаток турбін на підприємстві для підвищення її ефективності, щоб збільшити продуктивність, точність та якість обробки.

Метою магістерського дипломного проєкту є дослідження конструкції та методів обробки лопаток турбіни на підприємстві для розробки більш ефективного методу обробки лопаток, підвищуючи її продуктивність.

Задачами дипломного проєкту є:

- огляд та аналіз конструкції та особливостей лопаток авіаційних двигунів;
- огляд і аналіз методу обробки лопаток турбіни;
- формування та розробка більш ефективного методу обробки лопаток турбіни;

— аналіз та оцінка підвищення ефективності обробки розробленим методом.

Очікуваним результатом роботи є розробка більш ефективного методу обробки лопаток турбін, що дозволить підвищити продуктивність і точність процесу та знизити витрати на виготовлення. Оцінка переваг та недоліків розробленого методу для використання на підприємстві. Отримані результати будуть корисними для авіабудівних підприємств, які прагнуть оптимізувати виробничі процеси та впроваджувати інноваційні підходи.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз конструкції та особливостей лопаток авіаційних двигунів.

Авіаційні лопатки – це ключові компоненти авіаційних двигунів (рис. 1.1), які беруть участь у перетворенні енергії газових потоків у механічну енергію для приводу турбін та компресорів.

Робота лопаток відбувається в екстремальних умовах високих температур, тиску та швидкостей. Через ці умови, авіаційні лопатки повинні відповідати жорстким вимогам щодо матеріалів, геометрії та точності обробки. Одна із самих кількісних, високо-напружених та відповідальних деталей авіаційного двигуна [1].

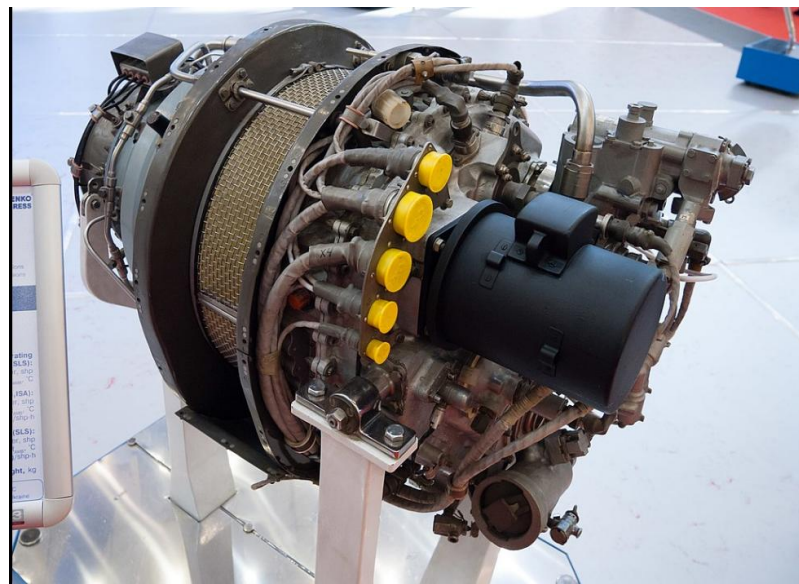


Рисунок 1.1 – Турбовальний двигун AI-450

AI-450 — це сучасний турбовальний двигун, що вирізняється високою потужністю, ефективністю та надійністю. Він активно використовується на легких вертольотах і літаках, задовольняючи вимоги авіаційної індустрії. Двигун AI-450 успішно встановлюється на вертольоти типу Мі-2, Ка-26, а також на літаки Як-18Т і Бе-103.

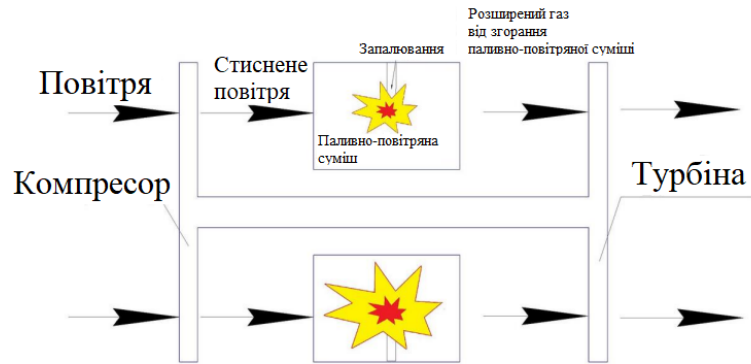


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення роботи газотурбінного двигуна

Диски призначені для розміщення робочих лопаток і передачі від них крутного моменту та осьової сили на вал. Основні частини диска (рисунок 1.3): обід з пазами для з'єднання з лопатками, полотно та ступиця. Диски бувають цільні одновінкові, двовінкові та складові. Найбільш поширеними є одновінкові цільні диски, які відзначаються простотою, надійністю та легкістю. У поперечному перерізі обід може бути прямокутним, трапецієподібним (звуженим до периферії або центру диска) або комбінацією цих форм [2, 3].

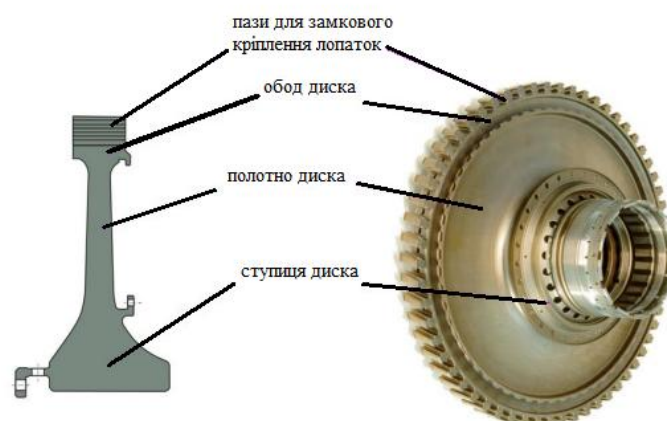
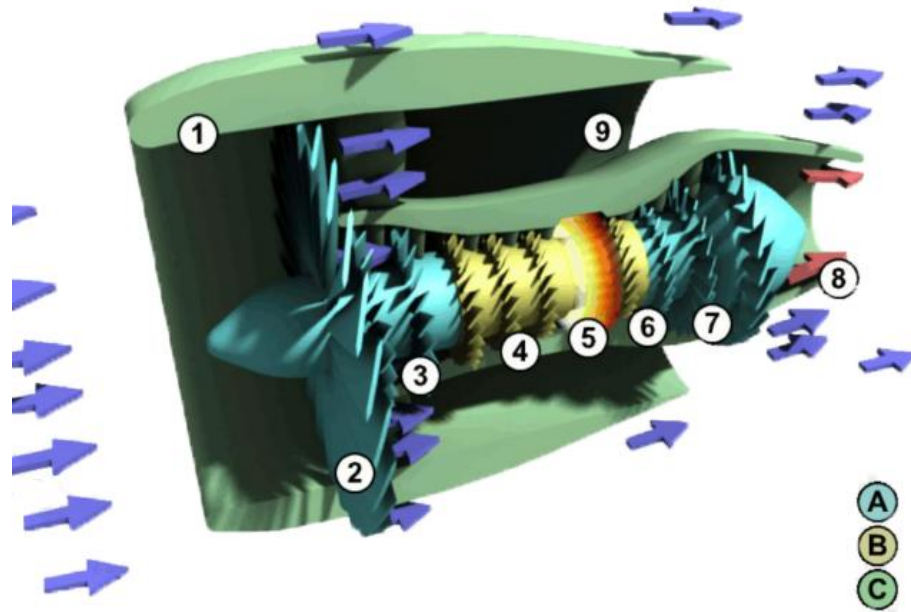


Рисунок 1.3 – Основні складові диска

На рисунку 1.4 наведені основні складові частини авіаційного газотурбінного двигуна [4].



А – ротор низького тиску, В – ротор високого тиску, С – компоненти статора, 1 – гондола, 2 – вентилятор, 3 – компресор низького тиску, 4 – компресор високого тиску, 5 – камера згорання, 6 – турбіна високого тиску, 7 – турбіна низького тиску, 8 – сопло газогенератора, 9 – сопло вентилятора

Рисунок 1.4 – Основні складові частини авіаційного двигуна

Авіаційні лопатки можна умовно поділити на кілька типів залежно від їхньої функції в двигуні.

Лопатки компресора, яка встановлюється у компресорі двигуна і відповідають за стиск повітря, яке надходить у камеру згорання. Вони працюють при відносно нижчих температурах у порівнянні з турбінними лопатками, проте підлягають великим механічним навантаженням через високі оберти.

Лопатки турбіни, які розташовані у гарячій частині двигуна та піддаються екстремальним термічним і механічним навантаженням. Їхня функція полягає у витягу енергії з гарячого газового потоку, що виникає після згоряння палива. Турбінні лопатки є найбільш технологічно складними через вимоги до термостійкості та міцності.

У авіадвигунах турбіна безпосередньо з'єднана валом з компресором, передаючи йому свій крутний момент, що підтримує роботу двигуна. Авіаційна турбіна, спрощено кажучи, складається з ротора, статора та допоміжних конструктивних елементів. Статор включає зовнішній корпус, корпуси соплових апаратів і корпуси підшипників ротора. Ротор, як правило, являє собою дискову конструкцію, де диски з'єднуються між собою та з ротором за допомогою різних додаткових елементів і методів кріплення.



Рисунок 1.5 – Лопатка турбіни

Лопатка повинна мати [1]:

- високі аеродинамічні властивості профільної частини, малий лобовий опір, велику підйомну силу, можливість працювати без зриву в широкому діапазоні кутів атак;

- високу втомну та механічну міцність, ресурсом та надійністю, так як на неї впливають значні знакозмінні та циклічні навантаження при експлуатації, а відцентрові і газові сили, що діють на лопатки, викликають великі напруги розтягування, кручення та вигину;
- мінімальні відхилення геометричних форм і розмірів профілю від розрахованих, так, як з їх збільшенням погіршується газодинамічна стійкість двигуна, зростають аеродинамічні втрати, що призводить до зменшення ККД компресора, втрати потужності, зростання питомих витрат і зрештою, зниження економічності двигуна;
- високі вібраційні характеристики для запобігання виникненню небезпечних резонансних коливань лопаток на робочих режимах двигуна;
- мінімальну можливу масу та достатню технологічність, що допускає масове виробництво.

Лопатки мають складну аеродинамічну форму, яка оптимізована для ефективного направлення повітря або газів. Одна сторона лопатки зазвичай є опуклою (наповнювальна сторона), а інша – увігнутою (сторона розрідження).

Більшість авіаційних лопаток мають змінний кут атаки вздовж їхньої довжини. Це кручення допомагає оптимізувати аеродинамічні властивості лопатки для рівномірного розподілу навантажень на різних ділянках її поверхні. Відповідно, кручення повинне бути реалізовано з високою точністю.

Лопатки зазвичай не мають постійного профілю по всій своїй довжині. Зазвичай, вони мають тонкі краї для мінімізації аеродинамічного опору і товсту основу для підвищення міцності.

Радіус на передньому і задньому краю лопатки відіграє важливу роль в аеродинаміці та механічній міцності. Тому навіть невеликі зміни в геометрії цих елементів можуть суттєво вплинути на роботу двигуна [4].

На рисунку 1.6 показана конструкція лопатки, вона складається із профільної робочої частини, так званого «пера» 2, та хвостовика 3.

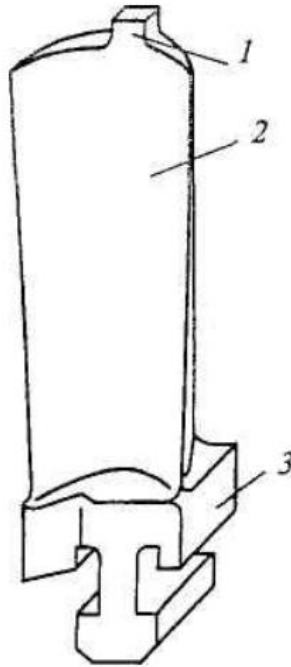


Рисунок 1.6 – Конструкція простої робочої лопатки

Лопатевий профіль авіаційної лопатки є ключовим елементом, який визначає її аеродинамічні характеристики та ефективність роботи в турбомашинах. Основною метою лопатевого профілю є направлення потоку повітря або газу таким чином, щоб максимізувати його енергію або підвищити ефективність роботи турбіни або компресора.

Лопатевий профіль — це форма поперечного перерізу лопатки, яка зазвичай нагадує крило літака, але з адаптаціями для роботи в турбомашинах, де тиск і швидкість газів набагато вищі.

Основні елементи профілю:

- Вхідна кромка, це передній край лопатки, який першим контактує з потоком газу або повітря. Він має обтічну форму для мінімізації турбулентності та забезпечення плавного потрапляння потоку на лопатку. Вхідна кромка повинна бути досить міцною, оскільки на неї припадають найбільші теплові та механічні навантаження.

– Вихідна кромка, задній край лопатки, який формує вихід потоку з лопатки. Вихідна кромка має бути максимально тонкою, щоб мінімізувати втрати енергії, але при цьому не настільки тонкою, щоб бути вразливою до деформацій або руйнування.

Профіль лопатки зазвичай має асиметричну форму, де одна сторона (опукла) більш вигнута, а інша (ввігнута) більш пласка. Ця різниця у формі сприяє створенню різниці тисків на обох поверхнях, що генерує підйомну силу або керування потоком повітря/газу. Лінія, що проходить між вхідною і вихідною кромками профілю. Вона показує загальний вигин лопатки. Чим більший вигин профілю, тим більший вплив лопатки на потік.

У сучасних ГТД застосовується велика різноманітність конструктивних рішень для виконання бандажних полиць лопаток компресора та турбіни (рис. 1.7). Це дає можливість підвищити міцність окремих елементів конструкції, покращити захист від вібрацій та збільшити економічні показники виробів. Бандажні полиці також сприяють оптимізації температурного градієнта в поперечному перерізі двигуна.

Складний профіль цієї полиці забезпечує утворення замкнутого контуру бандажного ободу під час збирання колеса турбіни, що покращує показники міцності та економічності виробу. З'єднання елементів бандажних полиць має різні вимоги: у середній частині між полицями потрібне перехідне з'єднання, тоді як у крайніх зонах необхідно забезпечити з'єднання з гарантованими зазорами.

Вимоги щодо точності між стиковими полицями лопатки виконуються в межах IT5 – IT6. Положення цих поверхонь відносно хвостовика лопатки також повинно відповідати високій точності, так як ці параметри безпосередньо впливають на поворот лопаток в диску. Цей поворот залежить від моменту сил, що виникають під час складання колеса турбіни. Невеликий кут нахилу стикових поверхонь ($\gamma = 4 - 5^\circ$) до площини обертання турбіни забезпечує поворот лопаток відносно їхніх осей та створює щільне з'єднання в бандажному ободі [2 – 4].

На верхніх бандажних полицях лопаток розташовані спеціальні ущільнювальні елементи (гребінці), які зменшують перетікання газу в турбіні через лабіринтове ущільнення. Цей конструктивний елемент виготовляється з точністю класу ІТ – 5 і вище.

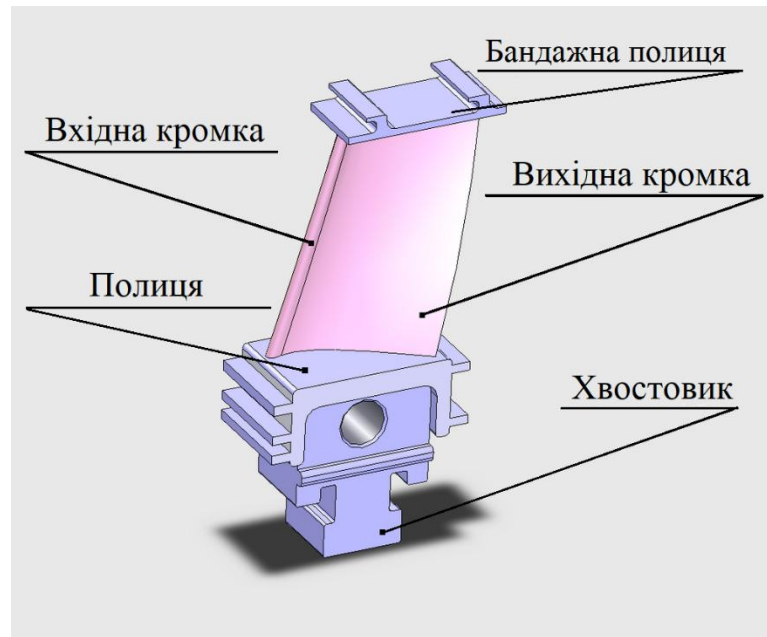


Рисунок 1.7 – Основні елементи лопатки

Компресорні лопатки працюють на стадії стискання повітря, тому їх профіль оптимізований для збільшення швидкості і тиску повітря.

Особливості:

- Нижчий вигин профілю для підтримання постійного тиску на вході та виході.
- Тонші профілі для досягнення високої аеродинамічної ефективності і зниження опору.

Турбінні лопатки працюють на стадії розширення газів, тому профіль цих лопаток оптимізований для максимального вилучення енергії з потоку гарячих газів.

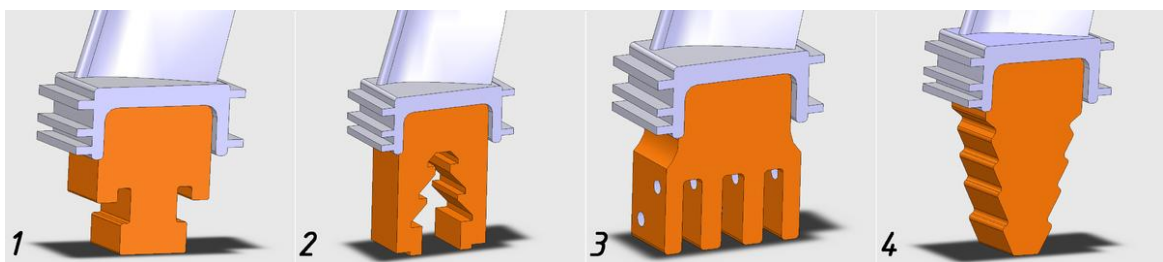
Особливості:

- Високий вигин профілю для максимального спрямування потоку газу і генерації великої підйомної сили.
- Більші кути атаки для ефективного використання енергії потоку газів.

Лопатевий профіль авіаційної лопатки є надзвичайно важливим елементом конструкції, який визначає її аеродинамічні характеристики та здатність витримувати високі температури та механічні навантаження. Вимоги до профілю включають точність виготовлення, оптимізацію форми для різних етапів роботи двигуна і здатність витримувати екстремальні умови експлуатації.

Хвостова частина лопатки є місцем, де лопатка кріпиться до ротора двигуна. Її конструкція відіграє важливу роль в забезпеченні надійного і міцного з'єднання лопатки з ротором, оскільки це з'єднання має витримувати значні механічні навантаження.

Конструкції хвостових з'єднань і відповідно хвостовиків лопатки можуть значно відрізнятися, вибираються вони з урахуванням необхідної міцності та можливостей виробничих технологій. Існують різні типи хвостовиків, зокрема Т-подібні, грибоподібні, вилкоподібні, ялинкоподібні, ластівчин хвіст та інші (рис. 1.8).



1 – Т – подібний, 2 – грибоподібний, 3 – вилкоподібний та 4 – ялинкоподібний хвостовики

Рисунок 1.8 – Типи хвостовиків лопаток

У деяких конструкціях хвостова частина може мати отвори для штифтів або болтів, які забезпечують додаткове кріплення. Це використовується в ситуаціях, коли механічне з'єднання потребує додаткового підсилення.

Жоден із видів хвостових з'єднань не має абсолютної переваги — кожен тип має свої сильні та слабкі сторони. Різні підприємства виготовляють різні типи з'єднань, використовуючи при цьому власні виробничі технології.

Один із найпоширеніших типів кріплення лопаток у роторі — це кріплення за допомогою так званого «ластівчиного хвоста» (рис. 1.9), лопатка 1 кріпиться в диску 3 за допомогою замкового з'єднання 2. Ця конструкція отримала таку назву через схожість зі з'єднанням, що використовують у меблярстві.

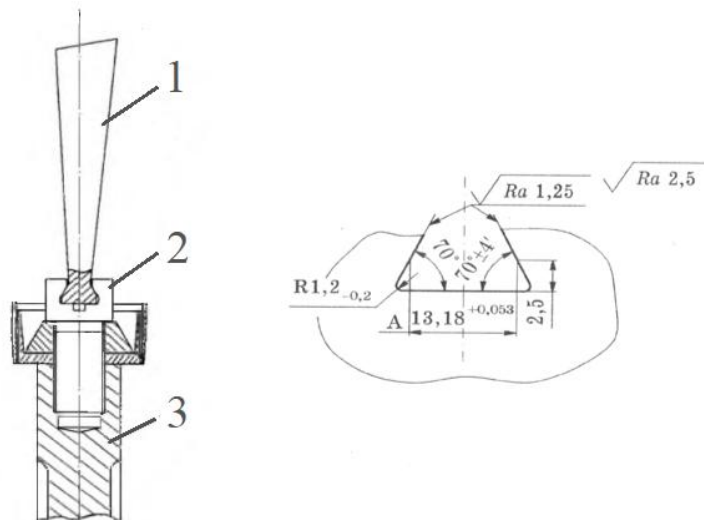


Рисунок 1.9 – Замкове з'єднання типу «ластівчин хвіст» та ескіз профілю паза

Лопатка має розширену, трапецієподібну форму у хвостовій частині, яка заходить в паз ротора, що також має відповідну форму. Між пазами утворюються виступи, які сприймають статичне і динамічне навантаження від суміжних лопаток.

Таке кріплення дозволяє лопатці витримувати значні відцентрові сили, які виникають під час роботи двигуна на високих обертах. «Ластівчин хвіст» забезпечує щільне механічне з'єднання без необхідності додаткових елементів кріплення.

Хвостова частина лопатки виконує кілька важливих функцій:

- Передача відцентрових сил, під час роботи двигуна лопатки обертаються на високих швидкостях, і на хвостову частину припадає велике відцентрове навантаження. Хвостова частина повинна ефективно передавати ці сили на ротор, не допускаючи деформації або пошкодження.
- Забезпечення жорсткості з'єднання, кріплення лопатки має бути надійним і таким, що запобігає мікро рухам між ротором і лопаткою, які можуть призвести до зносу або пошкодження з'єднання.
- Захист від вібрацій, лопатки під час роботи двигуна можуть зазнавати вібраційних навантажень. Хвостова частина повинна бути конструктивно такою, щоб мінімізувати вібрації і не допустити їх передачі на інші частини двигуна.

Щодо точності та якості обробки профілю хвостовика, розглянемо ці параметри на такий тип хвостовика, як «ластівчин хвіст» (рис. 1.10), так як він безпосередньо пов'язаний з об'єктом дослідження в цій роботі.

Хвостова частина лопатки встановлюється в паз диска з зазором 0.01 – 0.04 мм. В окремих випадка для підвищення частоти власних коливань лопаток, посадка лопаток в диски виконується з натягом до 0.015 мм, з використанням мідного шару (0.003 – 0.005 мм) для запресування.

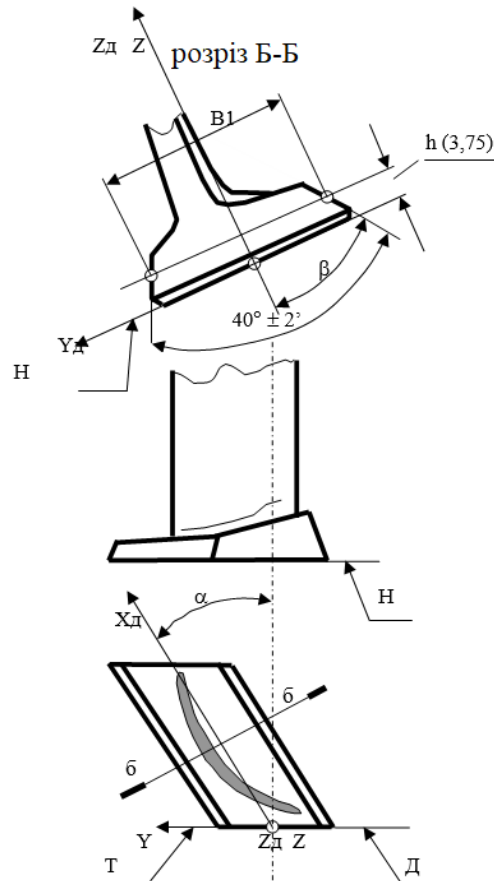


Рисунок 1.10 – Хвостовик лопатки типу «ластівчин хвіст» та його параметри точності

Основні параметри точності профілю замка «ластівчин хвіст» мають такі значення:

- допуск на товщину замка (розмір B1) в середньому розрізі а – а, розміщених відносно опорної поверхні на відстані h – 0.02 – 0.03 мм, (h = 3.75 мм).
- допуск на кут профілю замка (кут α) – 3'...5'.
- допуск на кут β, який визначає положення утворювальної замка відносно опорної поверхні Н – 2'...3'.
- допуск на опорну поверхню Н – 0.003 мм.
- шорсткість конструкторських поверхонь Rz 0.16 – 0.32 мкм.

Положення осі замка відносно осі диска може бути повернуто до осі Х (кут $\alpha = 30^\circ$), як показано на прикладі. В інших випадках використовують поворот осі замка відносно осі Z. Ці повороти створюють просторову орієнтацію лопатки в роторі, забезпечуючи необхідне положення центра ваги відносно диска і оптимальне положення вхідного профіля пера лопатки.

Хвостова частина авіаційної лопатки також є критично важливим елементом її конструкції, оскільки вона забезпечує надійне кріплення лопатки в роторі і ефективну передачу навантажень. Конструкція, зокрема форма «ластівчиного хвоста», дозволяє звести до мінімуму знос і гарантувати довговічність лопатки [3 – 4].

1.2 Матеріали з яких виготовляють лопатки.

При виготовленні авіаційних лопаток вибір групи матеріалів та конкретного матеріалу здійснюється конструктором відповідно до вимог, що висуваються до них. Конструкційні матеріали, що використовуються для виготовлення повинні відповідати певним вимогам, мати стабільні та відтворювані механічні властивості, достатню жароміцність і жаростійкість, високий опір корозії та високу питому міцність. Крім того, ці матеріали повинні легко піддаватися обробці на етапах формоутворення, а також на стадіях заготівельного та зварювального виробництва. Авіаційні лопатки виготовляються з високотехнологічних матеріалів, які повинні витримувати екстремальні умови.

ЖС (жароміцні сплави) можуть бути виготовлені на основі алюмінію, титану, заліза, міді, кобальту та нікелю. Найбільш широко в авіаційних двигунах застосовуються сплави на нікелевій основі, які мають необхідні жароміцні характеристики і використовуються в турбінних лопатках через їхню здатність витримувати високі температури ($1050 - 1100^\circ\text{C}$) і

забезпечувати стабільність в умовах циклічного навантаження. Такі матеріали мають високу термостійкість, жаростійкість та стійкість до корозії.

Найбільш високі вимоги до матеріалів мають лопатки які працюють в зоні турбіни двигуна, наприклад такі ливарні сплави на нікелевій основі як Inconel 738, ЖС32-ВІ, ЖС6У-ВІ та ЖС6К, які знайшли широке використання в виробництві авіаційних лопаток. Для виготовлення заготовок лопаток з направленою кристалізацією чи монокристалічною структурою використовують сплави ЖС – 30, ЖС – 30ВІ та інші [6].

ЖНС являються складно легованими сплавами, і більшість з них містять в середньому (% мас.): 0,06...0,20 С; 6,0...22,0 Сr; 0...20,0 Со; 0...10,0 Мо; 0...11,0 W; 0...50 Ti; 0...7,0 Al.



Рисунок 1.11 – Лопатки виготовлені з жароміцних нікелевих сплавів

Склад матеріалів, які широко використовуються для виробництва лопаток турбін наведено в таблиці 1.1. А механічні властивості цих матеріалів наведені в таблиці 1.2 [5, 6].

Таблиця 1.1 – Склад матеріалів які використовуються у виробництві лопаток турбін.

Хімічний елемент	Маркування сплаву				
	ЖС6К-ВІ	ЖС6УВІ	ЖС6ФВІ	ЖС – 30	ВЖЛ – 12Е
C	0.13 – 0.2	0.13 – 0.2	0.12 – 0.19	0.11 – 0.2	0.12 – 0.2
Si	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Mn	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Cr	9.5 – 12	8.0 – 9.5	4.0 – 7.0	5.0 – 9.0	8.5 – 10.0
Ni	основа	основа	основа	основа	основа
Mo	3.5 – 4.8	1.2 – 2.4	0.8 – 1.5	0.4 – 1.0	1.0 – 1.8
W	4.5 – 5.5	9.5 – 11.0	11.0 – 13.0	11.0 – 12.6	5.0 – 5.7
Al	5.0 – 6.0	5.1 – 6.0	5.1 – 6.0	4.8 – 5.8	5.0 – 5.7
Ti	4.0 – 5.5	9.0 – 10.5	6.0 – 10.5	7.5 – 9.5	8.0 – 10.0
Co	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0
Fe	-	-	0.8 – 1.2	-	0.5 – 1.0
Інші елементи	0.015	-	-	-	0.015

Таблиця 1.2 – Механічні властивості матеріалів які використовуються у виробництві лопаток турбін.

Параметр	ЖС6К-ВІ	ЖС6УВІ	ЖС6ФВІ	ЖС – 30	ВЖЛ – 12Е
σ_b , кгс/мм ²	75	85	85	85	85
δ , %	5	3	3	3	3
τ , %	-	4	-	-	7

Лопатки компресорів часто виготовляють з титанових сплавів (частка приблизно 60%, деяких легованих та жароміцних сталей через їх легкість та міцність при відносно нижчих температурах (до 800°C). Титан забезпечує

високу міцність при зниженій вазі, що важливо для зменшення інерції та підвищення ефективності двигуна.

Титанові сплави є ключовими конструкційними матеріалами, які широко використовуються в авіаційній та космічній техніці. Вони відзначаються високою в'язкістю і міцністю, а також відносно легко піддаються традиційним методам механічної обробки. Популярність титанових сплавів обумовлена їх високою міцністю при низькій питомій вазі, стійкістю до корозії, технологічністю виготовлення та обробки, а також значною поширеністю в природі.

Вітчизняні виробники сплавів адаптують титан для використання в умовах високих температур і значних механічних навантажень. Серед вітчизняних титанових сплавів, які використовують у виробництві авіаційних лопаток та інших частин турбомашин, можна виділити кілька.

Сплав ВТ20, містить алюміній і ванадій, що підвищує його міцність і температурну стійкість. Він використовується для лопаток компресорів та інших деталей, які піддаються значним навантаженням.

Широке застосування знайшли і такі сплави, як 1Х12Н9Т, ХН45МВТЮБР, 1Х12Н2ВМФ, 38Х2МЮА та інші.

Титановий сплав ВТ9 у вітчизняному виробництві. Завдяки своїм міцності та жароміцності, цей сплав широко застосовується для компресорних лопаток і компонентів двигунів, що працюють при температурах до 400-500°C.

Сплав ВТ3-1 з підвищеною стійкістю до корозії та теплової міцності. Використовується для лопаток і дисків компресорів, особливо в умовах високих температур та втомних навантажень.

Завдяки роботі при нижчих температурах доцільно використовувати матеріали на основі алюмінідів титану. Інтерметалідні сплави системи Ti-Al представляють собою широкий клас матеріалів, дослідження та розробка яких ведуться з 1970-х років. Ці сплави є перспективними для деталей

авіаційної техніки, оскільки вони поєднують унікальні механічні властивості з низькою питомою вагою.

Також слід зазначити, що в сучасних двигунах досліджуються і використовуються керамічні матеріали, оскільки вони можуть витримувати ще вищі температури, ніж метали, при цьому будучи легшими. Кераміка забезпечує високу термічну стабільність, проте потребує складної технології виробництва.

Всі ці сплави широко використовуються в українській авіаційній та оборонній промисловості для виробництва лопаток компресорів, дисків турбін та інших компонентів авіаційних двигунів. В таблиці 1.3, наведені приклади основних матеріалів які використовуються у виробництві лопаток двигунів.

Таблиця 1.3 – Перелік основних матеріалів які використовуються для виготовлення лопаток/

Лопатки компресора	
Матеріал лопаток статора	1X12H9T, 1X17H2, ХН45МВТЮБР, Х15Н5Д2Т, 38Х2МЮА, Х15Н5Д2Т, ВТ – 9, ВТ-20, ЖС6У – ВІ
Матеріал лопаток ротора	1X12H2ВМФ, 38Х2МЮА, ХН45МВТИБР, ВТ – 9
Лопатки турбіни	
Матеріал лопаток статора	ЖС6У – ВІ, ЖС6Ф – ВІ
Матеріал лопаток ротора	ХН77ТЮР, ХН62ВМКЮ, ХН60ВМТКЮ, ЖС – 3, ЖС6 – К, ЖС6К – ВІ, ВЖЛ – 12У, ЖС6У – ВІ, ЖС6Ф – ВІ, ЖС – 40, ЖС – 30ВІ, ЖС – 30

1.3 Методи отримання заготовок для виробництва авіаційних лопаток.

Заготовки – це початкові матеріали, з яких виготовляються лопатки, що використовуються у газотурбінних двигунах, зокрема в авіаційних турбінах. Лопатки турбін мають витримувати високі температури, тиск і навантаження, тому для заготовок ставляться дуже високі вимоги до матеріалу, форми та точності.

Ливарні заготовки, що виготовляються методом лиття, що забезпечує базову форму лопатки з мінімальною потребою в подальшій механічній обробці. Найбільш поширеним є інвестиційне лиття, що дозволяє досягати складної геометрії.

В авіаційних турбінах стають особливо популярні монокристалічні литі заготовки, оскільки мають високі показники міцності та стійкості до теплових деформацій.

Для менш критичних деталей, де високі температури не створюють настільки сильних навантажень використовуються полікристалічні литі заготовки.

Штамповані та ковані заготовки, практично не використовуються для виготовлення лопаток турбін, так як для таких лопаток переважно використовуються сплави на нікелевій основі та інші жароміцні сплави, щоб забезпечити кращі температурні характеристики, але при цьому збільшується твердість матеріалу, тому даний вид отримання заготовок практично не використовується.

Заготовки для лопаток турбін із деяких жароміцних сплавів можна виготовляти методом штампування. Цей метод є доцільним, особливо для серійного виробництва, оскільки дозволяє отримати заготовки, близькі до форми готового виробу, що зменшує обсяг механічної обробки та втрати матеріалу.

Штамування виконується у гарячому стані (температури 1000–1150°C), щоб забезпечити пластичність матеріалу та уникнути виниканню тріщин. Необхідно використовувати штампи з термостійких матеріалів, які можуть витримувати високу температуру та тиск. Жароміцні сплави мають обмежену пластичність навіть при високих температурах, тому процес вимагає оптимізації параметрів штампування, щоб уникнути дефектів або порушення структури [8].



Рисунок 1.12 – Послідовність технологічних переходів штамповки робочих лопаток компресора з прутка

Перевагами штампування:

- значне зменшення припусків на обробку (до 0.5 мм);
- зниження собівартості деталей за рахунок зменшення механічної обробки;
- висока повторюваність геометрії, що важливо для масового виробництва.

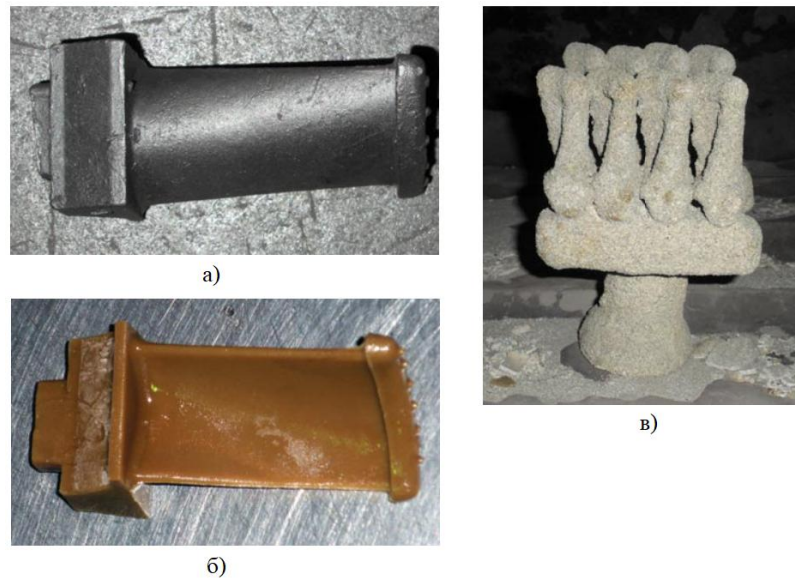
До недоліків можна віднести:

- високі початкові витрати на виготовлення штамсів і оснастки;
- технологічна складність при штампуванні деталей складної форми;

– вимога жорсткого дотримання температурного режиму для уникнення дефектів.

В процесі формоутворення пера лопатки методами пластичної деформації, важливою задачею є забезпечення точності геометричних розмірів та параметрів його поверхневого шару.

Для виготовлення заготовок турбінних лопаток на даний момент більш поширеним методом є точне лиття за виплавлюваними моделями (рис. 1.13), воно дозволяє отримувати заготовки з мінімальними припусками, завдяки чому зменшується час та складність механічної обробки.



а – відлита заготовка турбінної лопатки, б – воскова модель лопатки, в – сформована литникова система

Рисунок 1.13 – виготовлення заготовки турбінної лопатки методом лиття за виплавлюваними моделями

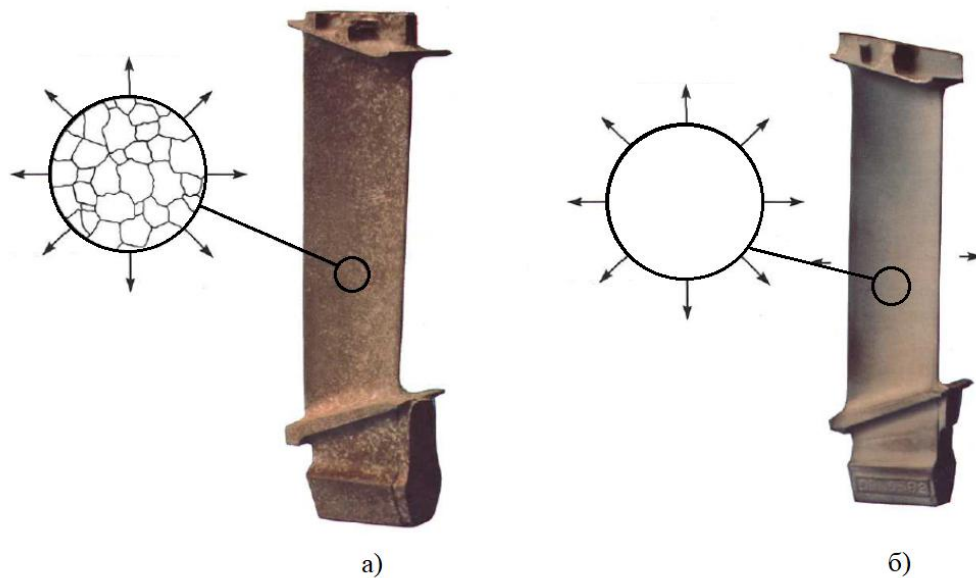
Лиття за виплавлюваними моделями має декілька переваг в порівнянні з іншими методами:

- можливість виготовлення заготовок складної форми з чистотою поверхні 5–6 класу та точністю 4-го класу;
- можливість виробництва порожнистих лопаток із малою товщиною стінок.

В даному методі виготовлення заготовок є і певні недоліки до яких можна віднести:

- підвищенні витрати на матеріали;
- тривалий виробничий цикл.

Дедалі частіше починають використовувати вищезгаданий метод отримання заготовок – монокристалічні литі заготовки. Це заготовки, які виготовляються методом вирощування одного кристала металу у формі, необхідній для кінцевого виробу. Такий підхід забезпечує значно вищу міцність і термостійкість, особливо в умовах інтенсивного теплового навантаження, де традиційні полікристалічні матеріали поступаються [18].



а – заготовка лопатки з полікристалічною структурою, б – заготовка лопатки з монокристалічною структурою

Рисунок 1.14 – Литі заготовки турбінних лопаток

До особливостей заготовок виготовлених таким методом можна віднести те, що монокристалічні матеріали не мають міжзернових меж, як у звичайних металевих сплавах. Їх відсутність зменшує можливість утворення мікротріщин, які виникають під час роботи під великим навантаженням і при високих температурах.

Також, такі заготовки значно стійкіші до деформації під постійним навантаженням, відомої як повзучість. У турбінах, які працюють на високих температурах, така стійкість є ключовою, адже деталі витримують постійні навантаження і не змінюють форми з часом.

Процес виготовлення монокристалічних заготовок є технологічно складним і включає кілька етапів, таких як вирощування монокристала за допомогою методу спрямованої кристалізації (наприклад, методом Бриджмена).

Спочатку метал розплавляють у вакуумному або інертному середовищі, щоб запобігти окисленню. Сплави на основі нікелю легують додатковими елементами, які підвищують жаростійкість та міцність.

Далі відбувається процес спрямованої кристалізації, під час якого заготовку повільно охолоджують так, щоб метал кристалізувався поступово, формуючи лише одну кристалічну решітку. Це досягається шляхом переміщення форми через температурний градієнт, який дозволяє одному кристалу рости в заданому напрямку. На цьому етапі надзвичайно важливо контролювати швидкість охолодження та температурний градієнт, щоб уникнути виникнення нових зерен і забезпечити формування єдиного кристалічного блоку.

Після лиття заготовку піддають термічній обробці для досягнення стабільних механічних властивостей і зняття внутрішніх напружень, що виникли під час кристалізації.

В такому методі є багато переваг, так як монокристалічні литі заготовки здатні витримувати екстремальні температури та навантаження. Ці

заготовки застосовують для виготовлення критично важливих лопаток у газових турбінах, які знаходяться найближче до камери згоряння.

Але є і недоліки, процес виготовлення монокристалічних заготовок є дорогим через складність процесу і необхідність використання спеціальних матеріалів та обладнання. Також висока чутливість до незначних порушень в процесі кристалізації, це може призвести до дефектів, тому процес потребує високого контролю якості.

Загалом, монокристалічні литі заготовки дозволяють створювати лопатки, які витримують екстремальні умови експлуатації і мають високу довговічність, що робить їх ідеальними для застосування в авіаційних турбінах [18].

Таблиця 1.4 – Методи виготовлення заготовок лопаток авіаційного двигуна.

Елемент двигуна	Види лопаток	Матеріали	Термічна обробка	Метод виготовлення заготовки
Компресор низького тиску	Лопатки статора	1X12H9, X15H5Д2Т, BT – 20, BT – 9	H + BB, H + B ВІДП	ВАЛ, ІЗШ, ТОШ, ВШШ
	Лопатки ротора	BT – 9, BT – 20	ВІТП	Ш, ВШШ, ІЗШ, ВАЛ
Компресор високого тиску	Лопатки статора	1X17H2, X15H5Д2Т, BT – 9, ЖС6У – ВІ	3 + В 3 + В ВІТП 3 + В	Ш, ВШШ, ІЗШ, ВАЛ
	Лопатки ротора	BT – 20	ВІТП	Ш, ВШШ, ІЗШ, ВАЛ

Кінець таблиці 1.4.

Турбіна	Лопатки статора	ХН80ТБЮ, ЖС6У – ВІ, ЖС6Ф – ВІ	З + СТ	ХШ, ЗВ, ЗБК
	Лопатки ротора	ХН77ТЮРУ – ВД, ХН78Т, ХН80ТБЮ, ЖС-3, ЖС6 – К, ЖС6У – ВІ, ЖС6Ф – ВІ, ЖС – 40, ЖС – 30ВІ, ЖС – 30	З + СТ	Ш, ЛНК, МКЛ

Умовні позначення: З – загартовування, В – відпуск, ВВ – високий відпуск, ВІДП – відпал, Н – нормалізація, СТ – стабілізація. Також Ш – штампування, ВАЛ – вальцювання, ІЗШ – ізотермічне штампування, ВШШ – високошвидкісне штампування, ТОШ – точне штампування, ХШ – холодне штампування, ЗВ – зварювання, ЗБК – збірна конструкція, ЛНК, лиття з направленою кристалізацією, МКЛ – монокристалічне лиття.

1.4 Вимоги до точності та якості обробки профілю лопаток

Точність обробки авіаційних лопаток є надзвичайно важливим аспектом, адже вона безпосередньо впливає на аеродинамічну ефективність, довговічність та безпеку роботи двигуна. Допуски геометрії та шорсткість поверхні безпосередньо впливають на ефективність потоку газу через компресор і турбіну.

Допуск на профіль лопатки це одна з найважливіших характеристик, що визначає ефективність потоку. Досить незначного відхилення, щоб порушити аеродинаміку лопатки, знизити її ККД і спричинити турбулентність. Зазвичай, допуски для профілю становлять від 0,01 мм до 0,05 мм, залежно від конкретної частини двигуна та умов його роботи [8].

Кут атаки і кривизна профілю мають бути точними, оскільки вони забезпечують правильний напрямок і швидкість потоку газу. Відхилення кута можуть спричинити підвищену вібрацію і зношування лопаток, особливо на високих швидкостях.

Шорсткість поверхні лопаток – це мікроскопічні нерівності, що залишаються на поверхні після механічної обробки. Вони можуть спричинити додатковий аеродинамічний опір, що погіршує роботу двигуна і підвищує витрати палива.

Лопатки турбіни працюють у середовищі високих температур, де будь-яка нерівність поверхні підвищує ризик окислення та пошкодження під впливом газів. Шорсткість також має залишатись низькою (близько Ra 0,4 мкм), щоб знизити ризик утворення тріщин і інших дефектів під навантаженням.

Також відомо, що допуск на виготовлення профілю пера окремих лопаток компресора задаються в діапазоні від 0.05 до 0.15 мм, а допуск на його зміщення відносно хвостовика від 0.1 до 0.3 мм.

Поверхні полицок окремих лопаток виконуються плоскими або профільними. Зазвичай площини полицок не перпендикулярні до повздовжньої осі лопатки. Положення полицок відносно бази задають з точністю 0.1 ... 0.3 мм.

Кутовий розворот профілю пера відносно осі не більше 20°.

Розкид частот власних коливань лопаток однієї ступені не повинен перевищувати 3 ... 5%.

Шорсткість поверхні лопаток знаходиться в діапазоні $Ra = 0.2 \dots 2.5$ мкм. Поверхні полицок хвостовика, антивібраційних полицок спрягаються з

профілем по всій його ширині поверхнею постійного радіуса, величина якого для різних лопаток змінюється від 1 до 10 мм.

Лопатки з висотою пера від 50 до 250 мм мають радіус спряження в границях від 2.5 до 4 мм з допуском на його величину ± 0.5 мм, а більш габаритні лопатки мають і більший радіус спряження відповідно.

Точність обробки авіаційних лопаток з дотриманням високих вимог до допусків і шорсткості поверхні є основою для забезпечення ефективності, безпеки і надійності авіадвигунів.

2 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД І АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ

Об'єктом даного дослідження є ефективна обробка авіаційних лопаток турбіни. Сама обробка виконується переважно на протяжних (обробка хвостової частини) та фрезерних (обробка профілю лопатки) верстатах. Також точність хвостової частини та профілю можуть покращувати шліфуванням та поліруванням на відповідному верстатному обладнанню. В даному проекті увага зосереджується саме на металообробці газотурбінних лопаток протяжним та фрезерним верстатами з метою покращення ефективності такої обробки.

2.1 Обробка хвостової частини лопатки на протяжних верстатах.

Обробка хвостовика авіаційної лопатки виконується на протяжному верстаті на якому формується форма та параметри хвостовика.

Для виконання протяжних робіт використовують горизонтально-протяжні та вертикально-протяжні верстати. Горизонтально-протяжні верстати застосовують для внутрішнього та зовнішнього протягування. Основні елементи та зовнішній вигляд горизонтального протяжного верстату наведено на рисунку 2.1.

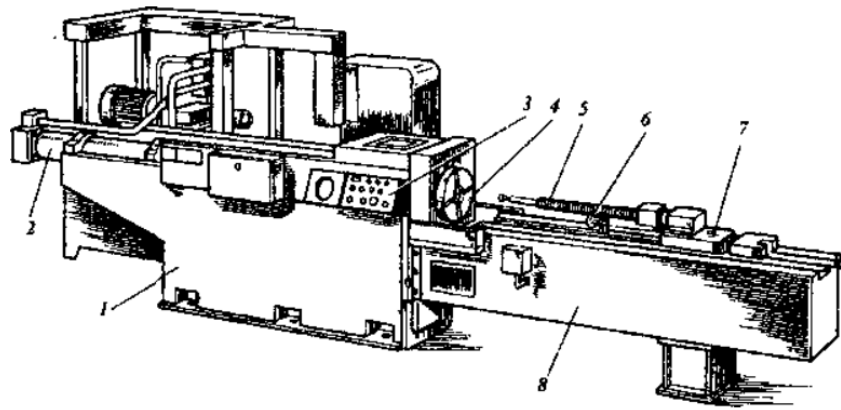


Рисунок 2.1 – Горизонтально протяжний верстат

Протягування – це метод механічної обробки, при якому використовується багатолезовий інструмент (протяжка) для видалення матеріалу з поверхні деталі. Розрізняють два основні види протягування: внутрішнє і зовнішнє.

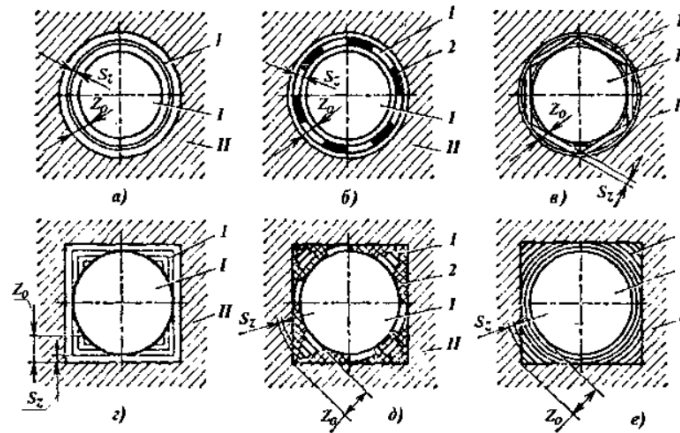
На протяжних верстатах можна досягти високих рівнів точності та якості обробки, які задовольняють жорсткі вимоги авіаційної промисловості. За допомогою протягування досягається висока точність оброблюваних поверхонь, 7-8 квалітет, що є досить високим показником для серійного виробництва [9, 10].

Завдяки жорсткій конструкції верстата і послідовному видаленню матеріалу кожним зубом протяжки, досягається точність отриманого профілю та повторюваність форми без відхилень. Це забезпечує стабільність розмірів і відповідність заданим параметрам.

Щодо якості поверхні то протяжні верстати дозволяють досягти низької шорсткості на рівні $Ra\ 0.4 - 3.2\ \mu m$. Така якість поверхні є достатньою для забезпечення надійного з'єднання та довговічності деталей [10].

Вибір схеми зрізання припуску істотно впливає на процес протягування та ефективність роботи протяжок. Кожна група обробляє метал у своїй зоні по частині периметра оброблюваної поверхні, що дозволяє

працювати з товстішими шарами металу, особливо на початкових етапах зрізання (рис. 2.2).



а, г – профільна; б, д – групова; в, е – генераторна; І – протяжка; ІІ – деталь

Рисунок 2.2 – Схеми зрізання припуску

Протяжки – це багатозубий металорізальний інструмент (рис. 2.3), який знімає шари металу без руху подачі, завдяки поступовому збільшенню висоти або ширини кожного наступного зуба відносно попереднього, що називається підйомом зуба.

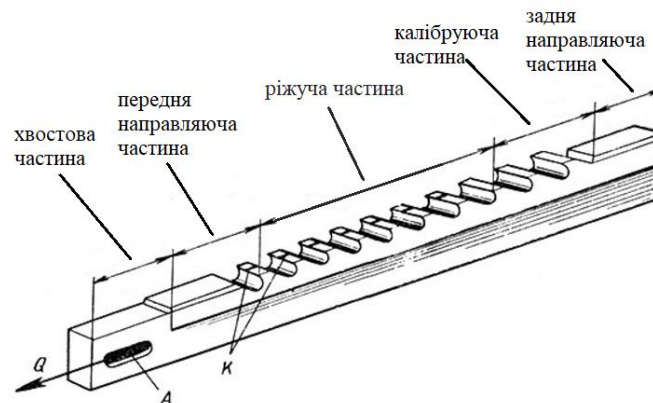


Рисунок 2.3 – Конструктивні складові протяжки

Протяжки широко застосовуються у масовому та багатосерійному виробництві завдяки їх високій продуктивності, здатності забезпечувати точну і якісну обробку.

Основними геометричними характеристиками зубів протяжки (рис. 2.4) є: крок зубів, глибина канавки для стружки, ширина задньої поверхні, радіус заокруглення канавки, ширина зуба, передній та задній кути та величина підйому на один зуб протяжки [9, 10].

В даній роботі увага зосереджується на спеціальних (фасонних) протяжках для зовнішньої обробки так, як вони безпосередньо пов'язані з обробкою хвостової частини яка буде розглядатись в подальшому.



Рисунок 2.4 – Різні види протяжок

Спеціальні протяжки є інструментами, що використовуються для одночасного формування складних геометричних профілів за один робочий прохід. Ці інструменти широко застосовуються для обробки хвостової частини авіаційних лопаток типу "ластівчин хвіст", яка забезпечує надійне кріплення лопатки в конструкції двигуна.

Спеціальні протяжки мають складний профіль із високими вимогами до точності. Для їх виробництва необхідне прецизійне обладнання, яке дозволяє витримати геометрію в межах допусків. Кути нахилу, радіуси, та

інші параметри мають бути виготовлені з високою точністю, щоб забезпечити відповідність профілю оброблюваної деталі.

Протяжки проектуються та виготовляються для обробки однієї або кількох певних деталей, що робить їх складними і дорогими інструментами, які економічно вигідні для масового виробництва. Водночас вони можуть бути використані у дрібносерійному виробництві, коли потрібна висока точність, яку можна забезпечити лише протягуванням.

Незважаючи на невеликі швидкості різання ($V = 1 - 12$ м/хв), протяжки мають високу продуктивність, оскільки зона різання охоплює всю оброблювану поверхню. Швидкість утворення поверхні відповідає швидкості різання, що відрізняє протягування від точіння чи свердління, де визначальним є подача за хвилину.

Висока продуктивність протяжок також зумовлена їхньою конструкцією, що поєднує чорнові, чистові та калібрувальні зуби, дозволяючи замінювати декілька операцій однією операцією протягування.

Вибір матеріалу для протяжки залежить від специфіки матеріалу заготовки, вимог до точності та обсягу виробництва.

Протяжки виготовляють з матеріалів, які поєднують високу міцність, твердість і стійкість до зносу, оскільки вони працюють в умовах інтенсивного тертя і навантаження.

Найпоширенішими матеріалами для протяжок є [10]:

1. Швидкорізальні сталі (P6M5, P18, P12Ф2K5M3 та інші) вони мають хорошу зносостійкість, підходить для обробки різних металів і сплавів.

2. Твердосплавні матеріали (BK8, T5K10, BK6M та інші), витримують високі механічні навантаження і тертя, забезпечуючи ефективну роботу протяжок при обробці твердих матеріалів.

3. Інструментальні сталі з покриттям, сталі, подібні до У10А або У12, можуть використовуватись з покриттями, такими як нітрид титану (TiN), що підвищує зносостійкість інструментів і зменшує коефіцієнт тертя.

Ці матеріали добре зарекомендували себе в промисловості й підходять для виготовлення протяжок для обробки деталей авіаційної промисловості, в нашому випадку хвостовика газотурбінної лопатки, завдяки їхнім механічним та термостійким властивостям.

Обробка профілю хвостовика лопатки турбіни на протяжному верстаті – це процес, який формує точну геометрію хвостової частини, що забезпечує надійне з'єднання з диском ротора. Метою протягування в даному випадку є досягнення точних розмірів та необхідної шорсткості поверхні.

Основні етапи обробки профілю хвостовика:

- Закріплення заготовки лопатки, лопатка закріплюється на верстаті так, щоб її хвостовик міцно утримувався, оскільки під час протягування виникає велике навантаження на інструмент та заготовку. Важливо, щоб закріплення було стабільним і не викликало деформацій, адже це впливає на точність обробки профілю.

- Підготовка протяжного інструмента, протяжка розробляється спеціально для відповідного профілю хвостовика і складається з ряду ріжучих елементів (зубців), кожен з яких виконує свою роль у видаленні матеріалу. Перші зубці протяжки здійснюють первинне зняття матеріалу, поступово формуючи базовий контур, а наступні зубці створюють остаточний профіль і шорсткість поверхні.

- Процес протягування, протяжка виконує один безперервний прохід через заготовку, що дозволяє поступово вирізати матеріал і формувати профіль.

- Рух протяжки є строго контрольованим, щоб досягти високої точності профілю, зокрема в критичних місцях, таких як кути та бічні стінки потрібного профілю. Матеріал знімається шарами, що дозволяє знизити рівень залишкових напружень і досягти потрібної геометрії.

- Формування геометрії, Профіль хвостовика повинен забезпечувати підвищену міцність з'єднання лопатки з диском та

витримувати великі відцентрові навантаження. Протяжка поступово формує цей профіль, досягаючи точності, яка забезпечує мінімальні допуски на кут нахилу стінок, ширину профілю, глибину та інші критичні параметри.

– Контроль шорсткості і точності, оскільки профіль хвостовика має бути високоточним для надійного з'єднання, важливим є досягнення шорсткості поверхні, яка відповідає проектним вимогам. Геометричні параметри контролюються після обробки, використовуючи оптичні або координатно-вимірювальні машини для перевірки допусків на ключових ділянках.

Щодо режимів різання то для обробки протягуванням жаростійких литих сплавів типу ЖС6К рекомендують низькі швидкості різання (V) для швидкоріжучих протяжок – 1.5 м/хв, а для твердосплавних – 2...10 м/хв. Передній кут у більшості протяжок – 12...15°, а задній кут – 2...3°. Подачу на зуб (S_z) протяжки рекомендують від 0.1 мм/зуб для ріжучих зубів до 0.01...0.005 мм на чистовий зуб. Деякі рекомендації, щодо режимів різання та параметрів протяжок при обробці хвостовиків лопаток протягуванням наведені в таблиці 2.1 [9, 10].

Таблиця 2.1 – Рекомендації щодо протягування при обробці важко оброблювальних матеріалів.

Оброблювальний матеріал	Ви обробки	Режими різання	Параметри протяжки
ЖС6К	Протяжка хвостовиків	$V = 1.5...4$ м/хв	$P18, \gamma = 15^\circ, \alpha_p = 3...5^\circ, \alpha_k = 1^\circ 30'...2^\circ$
BT8, BT9, BT4	Протяжка замків та пазів	$V_n = 15...20$ м/хв, $V_k = 30$ м/хв, $S_z = 0.01...0.2$ мм/зуб	$P18, \alpha_o > 1^\circ 30'$

Кінець таблиці 2.1

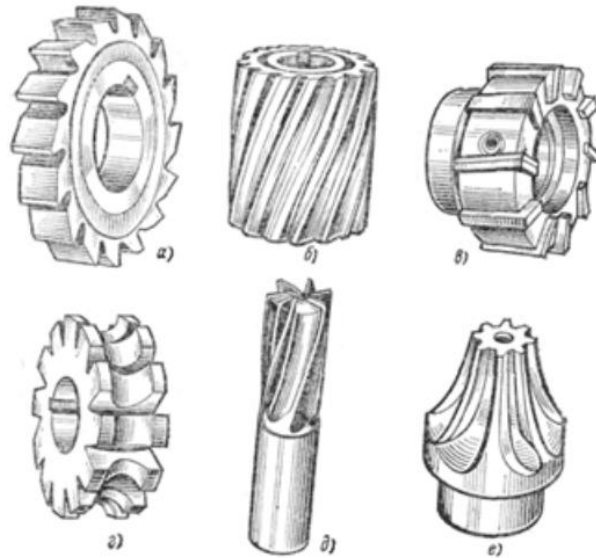
ЖС6К	Зовнішнє протягування	$V_{BK8} = 2...10$ м/хв $V_{P9M4K8} = 1.5$ м/хв	$\gamma = 5^\circ, \alpha = 70^\circ, f_n = 0.2$ мм, $f_z = 0.1$ мм, $\gamma_o = 5^\circ$
BT8	Зовнішнє протягування	$V_{BK6M} = 25...40$ м/хв, $S_z = 0.05$ мм/зуб	$\gamma = 10^\circ, \alpha = 3...4^\circ, f_n = 0.2$ мм, $f_z = 0.1$ мм, $\gamma_o = 5^\circ$

Умовні позначення: V_n – попередня швидкість протягування; V_k – кінцева швидкість протягування; α_p – задній кут ріжучого зуба; α_k – задній кут калібруючого зуба; γ_o – оптимальний передній кут; α_o – оптимальний задній кут.

2.2 Обробка профілю лопатки на фрезерних верстатах.

Фрезерування – це процес обробки різанням, при якому різальний інструмент (фреза) здійснює обертальний рух, а заготовка, що обробляється, поступальний рух або рух подачі, це дозволяє обробити площини, пази, канавки, складні профільні форми та зубчасті колеса

Основні типи фрез: циліндричні, торцеві, кінцеві, дискові, фасонні, конічні (рис. 2.5).



a, б – циліндричні фрези з прямими та гвинтовими зубами, *в* – торцева фреза, *г* – фасонна фреза, *д* – кінцева фреза, *е* – модульна фреза

Рисунок 2.5 – Основні типи фрез

Особливу увагу слід надати сферичній фрезі – це вид кінцевих фрез з напівсферичним кінцем, який дозволяє створювати гладкі та заокруглені поверхні.

Завдяки напівсферичному кінцю сферична фреза здатна виконувати точну обробку заокруглень і 3D-профілів, що особливо корисно при фрезеруванні криволінійних поверхонь по типу профілю лопатки.

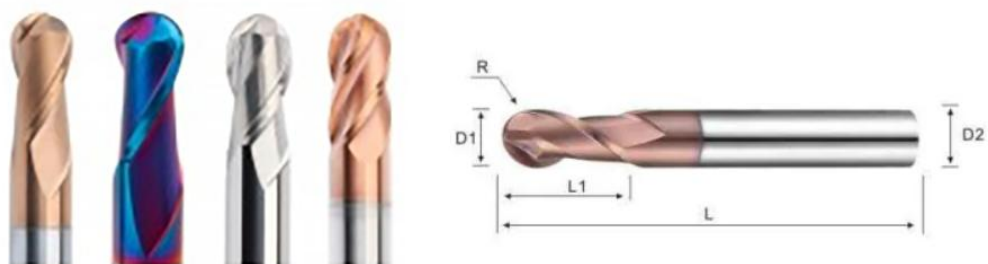


Рисунок 2.6 – Сферична фреза

Основними матеріалами для виготовлення фрез є швидкорізальна сталь (Р6М5, Р18, Р9Ф5), фрези призначені для обробки сталі, чавуну, м'яких металів, твердий сплав (Т5К10, ВК8, Т15К6), фрези мають високу зносостійкість і стійкі до температури, що дозволяє використовувати їх при високошвидкісному фрезеруванні твердих матеріалів, керамічні та надтверді матеріали. призначені для обробки високоміцних матеріалів та роботи на високих швидкостях [11].

Основні параметри фрез включають діаметр, кількість зубців, кут нахилу зубців, матеріал ріжучої частини, а також вид і розташування ріжучих поверхонь. Ці характеристики впливають на точність, продуктивність і тип поверхонь, які можна обробляти за допомогою фрези.

До режимів різання при фрезеруванні належать швидкість різання V , подача S , глибина різання t та ширина фрезерування B .

Фрезерні операції на верстатах з ЧПК зазвичай включають чорнові та чистові етапи обробки. Для виконання чистових операцій необхідно передбачити проміжні припуски та відповідні міжопераційні розміри. У загальному випадку припуски при фрезеруванні можуть бути визначені за таблицями або розраховані.

Типовим базовим елементом при розробці фрезерних операцій є сукупність оброблюваних зон, що утворюють оброблювану область. Кожен технологічний перехід передбачає обробку однієї або кількох таких областей.

Фрезерний верстат – це металообробний верстат, призначений для обробки різанням плоских та об'ємних поверхонь, пазів, канавок, зубчастих коліс, різьби та інших деталей шляхом видалення шару матеріалу з заготовки.

Фрезерні верстати широко застосовуються у машинобудуванні, авіаційній промисловості, виготовленні інструментів та штамів. Верстати можуть бути як універсальними, що підходять для різних операцій, так і спеціалізованими для виконання конкретних завдань.

У цій роботі особливу увагу буде приділено фрезерним верстатам із числовим програмним керуванням (ЧПК), вони відрізняються тим, що їх робота повністю контролюється програмою, що дозволяє задавати точні параметри обробки та виконувати складні операції без участі оператора. Зокрема вертикальні фрезерні верстати з ЧПК, оскільки їхні технологічні можливості та функціональні особливості мають безпосереднє відношення до процесу обробки лопаток для авіаційних двигунів.

Вертикальні фрезерні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) – це обладнання, де головний шпиндель (на якому закріплюється фреза) розташований вертикально відносно поверхні оброблюваної деталі. Верстати цього типу застосовують для обробки поверхонь різного рівня складності.

Обробка профілю пера лопатки на вертикальному фрезерному верстаті з числовим програмним керуванням (ЧПК) є складним і високоточним процесом, що вимагає дотримання вимог до точності геометрії та якості поверхні. На вертикальному фрезерному верстаті з ЧПК ця операція виконується за допомогою спеціальних інструментів і багато-осьових систем позиціонування для точного профілювання [11].

Типові етапи обробки профілю пера лопатки на фрезерному верстаті:

1. Затиск заготовки в спеціальне пристосування (зазвичай призначене для роботи з авіаційними лопатками), щоб забезпечити жорстке і стабільне кріплення. Налаштування нульових точок для точного позиціонування заготовки щодо інструменту. Орієнтація заготовки залежно від форми профілю, яка враховує початкову геометрію заготовки та потрібний профіль пера.

2. Чорнова обробка (формування контуру профілю), зняття основної маси матеріалу, наближення до форми кінцевого профілю пера. Інструменти які використовуються це кінцеві фрези, які витримують великі навантаження при чорновій обробці. Щодо режимів різання, це зазвичай невисока швидкість обертання шпинделя, висока подача (для уникнення надмірного

нагрівання), та активне охолодження МОР. Фрезерування виконується уздовж контуру пера, з поступовим заглибленням у матеріал. Виконується зняття товщини за декілька проходів, що забезпечує видалення основного шару металу.

3. Напівчистова обробка (формування точнішого контуру), підготовка профілю до чистової обробки, видалення залишків матеріалу та формування точнішої геометрії. Можуть використовуватись кінцеві фрези різної конфігурації, наприклад збірної конструкції. Середня швидкість обертання шпинделя, подача знижена для досягнення більшої точності, постійне охолодження МОР. Фреза слідує уздовж периметру профілю з меншою глибиною проходу, забезпечуючи точніше відтворення форми. Декілька проходів по периметру пера, орієнтованих на вирівнювання залишків від грубої обробки.

4. Чистова обробка (кінцеве профілювання), формування кінцевої геометрії профілю пера з високою точністю та мінімальною шорсткістю. Використовуються сферичні та шарові фрези для поліпшеної якості обробки поверхні. Низька швидкість подачі для досягнення високої точності та підвищена швидкість обертання шпинделя, використовується рясне охолодження МОР основна мета якого, це стабілізація температури та запобігання перегріву. Проходи виконуються з дуже малою глибиною (чистове різання). Контур профілю обробляється детально, забезпечуючи відповідність точності до мікронів.

5. Контроль якості після обробки, контроль точності геометрії та перевірка шорсткості поверхні для відповідності вимогам, а також візуальний огляд для виявлення тріщин, задирок чи інших дефектів.

6. Корекція та доопрацювання, у разі виявлення невідповідності під час контролю якості проводяться додаткові корекційні операції. Може бути виконане додаткове фрезерування у проблемних зонах.

Деякі рекомендації стосовно режимів різання при обробці жароміцних сплавів звичайним фрезеруванням наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Рекомендації щодо режимів різання при обробці ЖС звичайним фрезеруванням.

Вид обробки	Обр. матеріал	Матеріал інстр.	Швид. різання, м/хв	Подача, мм/зуб	Глиб. різання, мм	γ (α), град.
Торцеве фрезерування	ХН35ВТЮ	ВК6М	32...49	0.3...0.1	3.0	5-8, -5
	ВТ3-1	ВК6М	66...54	0.3...0.1	3.0	(15)
	ЖС6К	ВК8	15...45	0.15	0.5	-8 (10)
Фрезерування пазів	ХН77ТЮР	ВК8 ВК6М	15...45	0.02...0.05	0.25	0 (18)

3. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Метою даного дослідження є підвищення ефективності обробки лопатки турбіни. Розробивши більш ефективний процес металообробки хвостової та профільної частини (пера) газотурбінної лопатки планується підвищити ефективність всієї обробки.

3.1 Опис матеріалу заготовки лопатки турбіни.

Матеріал лопатки авіаційної турбіни яка обробляється в даному дослідженні є жароміцний нікелевий ЖС26 – ВІ, в таблиці 3.1 наведений хімічний склад цього матеріалу. Він був розроблений спеціально для роботи в умовах екстремальних температур і механічних навантажень [5].

Таблиця 3.1 – Хімічний склад жароміцного нікелевого сплаву ЖС26 – ВІ середнього рівня легування, %.

Сплав	Масова частка елементів, %										
	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	V	D	Ni
ЖС26 – ВІ	0.15	5.0	9.0	1.1	11.7	5.9	1.0	1.6	1.0	0.015	Основа

Матеріал має дуже хороші механічні властивості та характеристики, таблиця 3.2 (випробування на тривалу міцність виконували до руйнування зразків), сплав витримує тривалі навантаження при високих температурах не втрачаючи свої характеристики міцності. Також сплав ЖС26 – ВІ стійкий до окислення та корозії, що особливо важливо для лопаток турбін, де умови їх експлуатації дуже агресивні. Він показує високий опір до зношування, що збільшує термін служби лопаток.

До особливостей можна віднести те, що через високу твердість і міцність ЖС26 – ВІ вимагає спеціальних технологій обробки, включаючи використання твёрдосплавного або керамічного інструмента і рясного охолодження для уникнення перегріву та деформацій.

Таблиця 3.2 – Механічні характеристики сплаву ЖС26 – ВІ.

Параметр	Значення
Механічні характеристики сплаву за температури 20 °С	
Тимчасовий опір σ_b , Н/мм ² (кг/мм ²), не менше	830 (85)
Відносне подовження δ , %, не менше	6
Тривала міцність за температури 975 °С	
Постійно додана напруга σ , Н/мм ² (кг/мм ²)	255 (26)
Час до руйнування τ , годин, не менше	40

Цей сплав має унікальні властивості, що забезпечують стабільну роботу лопаток турбін в умовах високих температур, механічних навантажень і корозійного середовища.

3.2 Отримання заготовки лопатки турбіни.

На підприємстві заготовка виготовляється методом гарячого штампування. Штампування є одним із найбільш ефективних методів отримання заготовок, що забезпечує високу точність і економію матеріалу. Цей метод широко застосовується у виробництві деталей складної форми, таких як лопатки турбін. Перервами такого методу штампування для лопаток є, економія матеріалу (зниження відходів), висока точність заготовки, близька до готової форми, поліпшення механічних властивостей за рахунок

уцільнення матеріалу під час деформації, а також можливість виготовлення заготовок зі складною геометрією.

Сплав ЖС26 – ВІ відрізняється високою твердістю і жароміцністю, але має обмежену пластичність навіть при високих температурах. Тому процес штампування вимагає використання спеціалізованого обладнання, яке може працювати при високих температурах, також дотримання режимів температурного та деформаційного впливу (заготовка нагрівається приблизно до температури 1000–1150°C у спеціальній печі для покращення пластичності сплаву) та проведення термічної обробки після штампування для відновлення структури сплаву.

1. Припуск на перо лопатки $0.7^{+0.5}$ мм на сторону (рис. 3.1).
2. Нерівномірність припуску за перерізами пера в межах фактичного припуску.
3. Проміжні перерізи пера лопатки відтворюються плавним переходом між заданими.

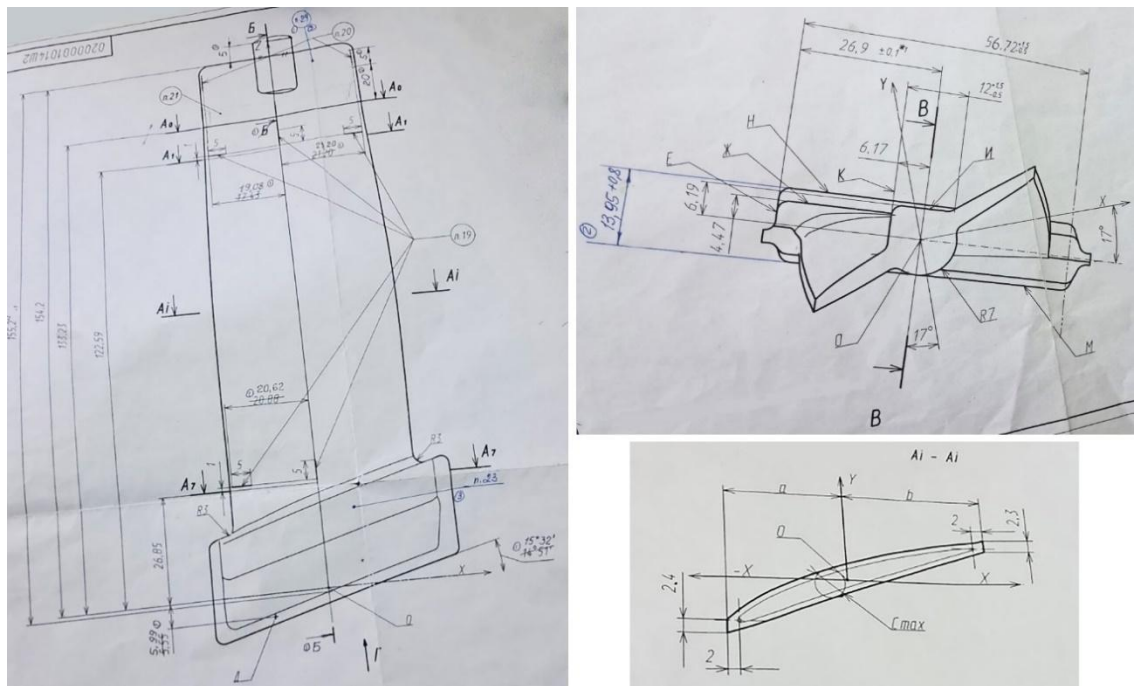


Рисунок 3.1 – Креслення заготовки лопатки турбіни

4. Припуск на хвостову частину задається $0.8^{+0.4}$ мм на сторону (рис. 3.1, 3.2).
5. * Розміри для довідників.
6. ^{*1} Розрахункові розміри.
7. Невказані радіуси 2 мм.
8. Штамповані нахили 7° .

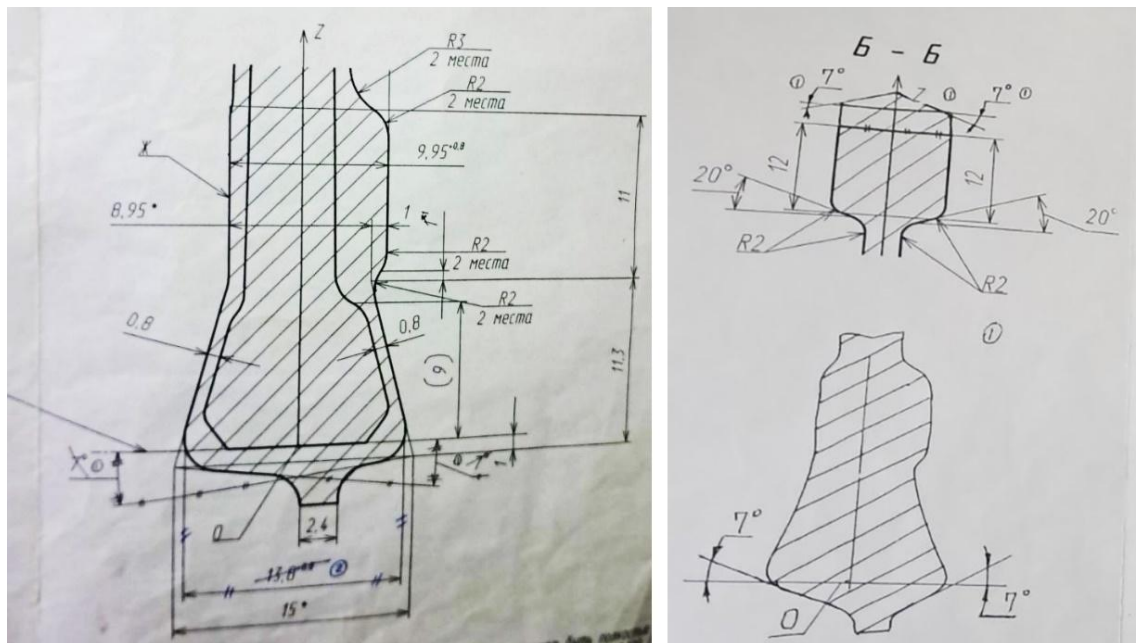


Рисунок 3.2 – Креслення заготовки лопатки турбіни (хвостова частина)

Якісні показники:

- оброблюваність матеріалу різанням складна;
- на більшості операцій при обробці деталі можливо витримувати принцип постійності і суміщення баз;
- не всі поверхні доступні для обробки стандартним ріжучим інструментом;
- на деталі мала кількість поверхонь правильної геометричної форми, які можна використовувати за базові;
- вага деталі та її габаритні розміри не потребують застосування

спеціальних підйомних механізмів;

– допуски та граничні відхилення на розміри відповідають стандартним значенням.

3.3 Обробка хвостової частини лопатки протягуванням.

Хвостова частина лопатки має вигляд «ластівчин хвіст», і обробляється на горизонтальному протяжному верстаті модель 7523, технічні характеристики якого наведені в таблиці 3.3.

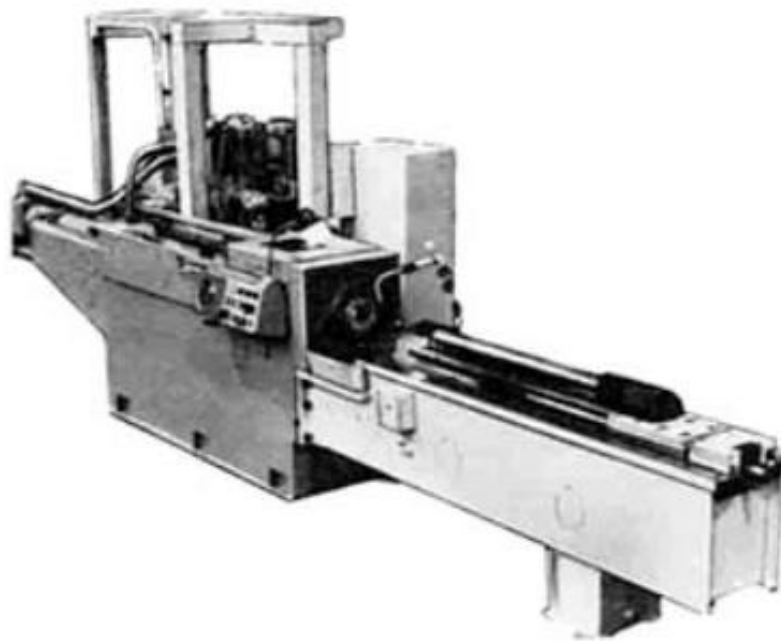


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд горизонтально протяжного верстата

7523

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики горизонтального протяжного верстата моделі 7523.

Параметр	Розмірність	Значення
Номінальне тягове зусилля	кН	100
Відстань від станини до отвору під планшайбу	мм	250
Відстань від опорної плити до напрямних станини	мм	295
Діаметр планшайби	мм	280
Діаметр отвору в планшайбі	мм	125
Конусність отвору робочого патрону		Метричний 80
Конусність отвору допоміжного патрону		Морзе 5
Відстань від підшви основи до осі протягування	мм	900
Максимальна довжина робочого ходу	мм	1200
Ширина опорної плити	мм	520
Максимальна (мінімальна) швидкість робочого ходу	м/хв	11.5 (1.5)
Довжина відводу та підводу протяжки	мм	470
Швидкість підводу (відводу)	м/хв	11.2 (18.2)
Максимальний діаметр інструменту	мм	120
Максимальна (мінімальна) довжина інструменту	мм	1365 (300)
Габарити верстата	мм	6000x2000x1715
Маса верстата	кг	4100
Сумарна потужність електродвигунів	кВт	11.27

Хвостова частина лопатки (поверхні 1 – 5, рисунок 3.4) обробляються блоком багатосекційних протяжок (рис. 3.5, 3.6). Припуск на обробку 0.8 мм.

Кожен зуб протяжки знімає певну частину матеріалу, щоб забезпечити плавність процесу. Протяжка затискається в спеціальний тримач який за допомогою гідравлічного приводу надає їй швидкість різання.

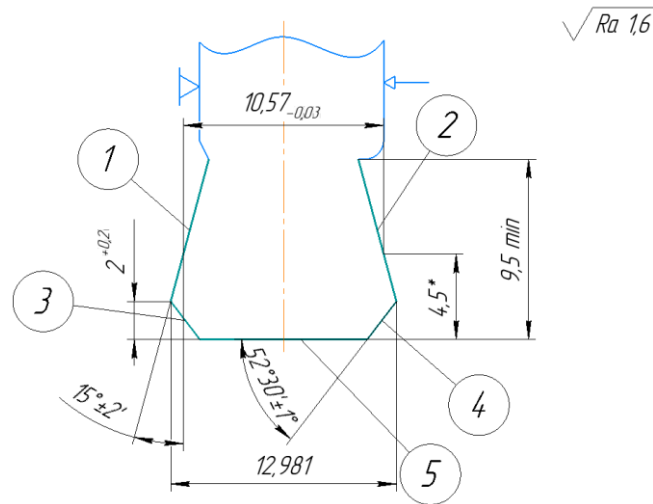


Рисунок 3.4 – Ескіз обробки хвостовика «ластівчин хвіст»

Протяжки виконані із швидкорізальної сталі Р18Ф2М2 з твердістю 60-62 HRC. Підйом на зуб S_z задається для чорнових зубів 0.05 мм, для чистових $S_z = 0.01$ мм. Швидкість протягування $V = 4$ м/хв.

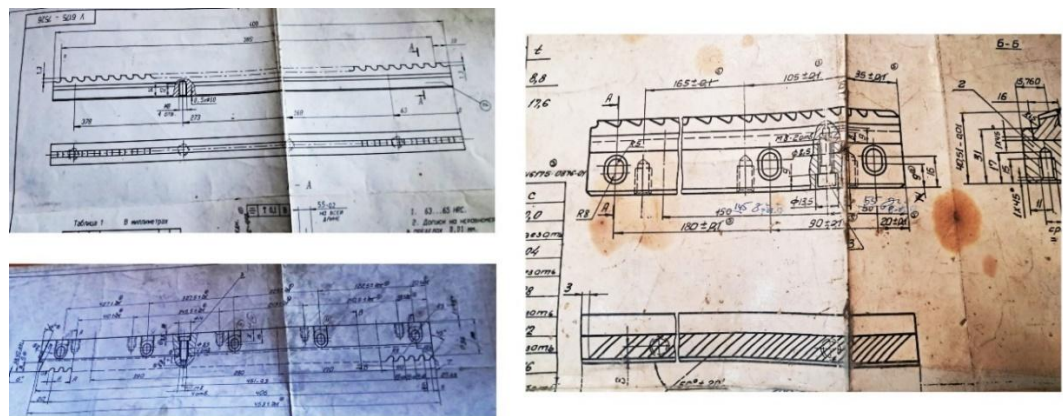


Рисунок 3.5 – Характеристики протяжок якими обробляється хвостовик «ластівчин хвіст»



Рисунок 3.6 – Протяжки якими виконується обробка хвостовика лопатки «ластівчин хвіст»

3.4 Обробка профілю лопатки на вертикальному фрезерному верстаті з ЧПК.

Профіль лопатки (перо, корито) обробляється на 4-х осьовому вертикальному фрезерному верстаті з системою числового програмного керування WL4M, верстат був модернізований на виробництві на базі моделі MC6104 – 13W, технічна характеристика верстата наведена в таблиці 3.4.



Рисунок 3.7 – Вертикальний фрезерний верстат з ЧПК, модель
MC6104 – 13W

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики фрезерного верстата MC6104 –
13W.

Параметр	Розмірність	Значення
Точність позиціювання осей	мкм	30
Лінійні осі		X, Y, Z
Поворотні осі		A
Головний привід		Kollmorgen S772
Мотор-шпиндель		KESSLER DMS
Гранична частота обертання шпинделя	об/хв	0-9000
Максимальний крутний момент	Н·м	293
Тип оправки		SK-50

Кінець таблиці 3.4.

Потужність шпинделя	кВт	31
Максимальне значення подачі столу	мм/хв	0-8000
Максимальна частота обертання	об/хв	10000
Відстань від торця шпинделя до робочої поверхні столу	мм	400
Максимальне переміщення шпинделя по осі Z	мм	200-250
Приводи осей X, Y, Z		Kollmorgen AKD-P02407
Двигуни осей		Kollmorgen AKM-73L
Номинальний крутний момент	Н·м	34.4
Номинальна частота обертання	об/хв	1400
Привід поворотного столу		Kollmorgen S748
Двигун поворотного столу		ETEL TMB-0210-150
Номинальний крутний момент	Н·м	368

Для фрезерної обробки лопатки турбіни використовується 4-осьовий вертикальний консольний фрезерний верстат із числовим програмним керуванням (ЧПК). Однак у даній технології обробки можливості верстата, що пов'язані з використанням поворотної осі (четвертої осі), не застосовуються.

Вибір цього обладнання зумовлений наявністю його на підприємстві, а також його придатністю для виконання необхідних операцій із забезпеченням потрібної точності та якості обробки. Верстат виконує обробку, що передбачає рух по трьох координатах (X, Y, Z), забезпечуючи обробку пера лопатки в межах вимог технологічного процесу.

Обробка проводиться з активним використанням МОР (рис. 3.8), маршрут обробки профілю лопатки наведений таблиці 3.5. Характеристики інструментального оснащення наведено в таблиці 3.6, дане оснащення виготовлене в інструментальному цеху на підприємстві. Допоміжним устаткуванням слугують затискні пристрої в яких затискається заготовка, дане спеціальне устаткування для обробки лопаток виготовлене на підприємстві. Також використовується інструментальна оправка SK-50, рисунок 3.7.

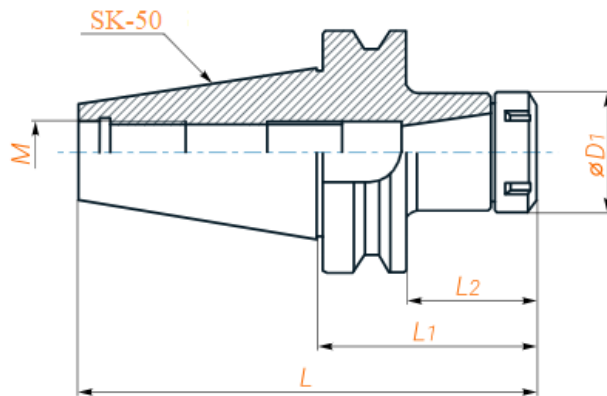
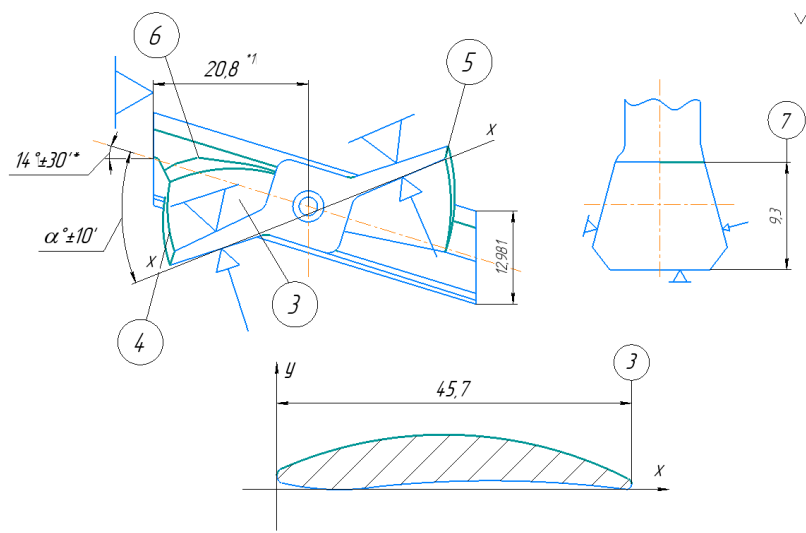
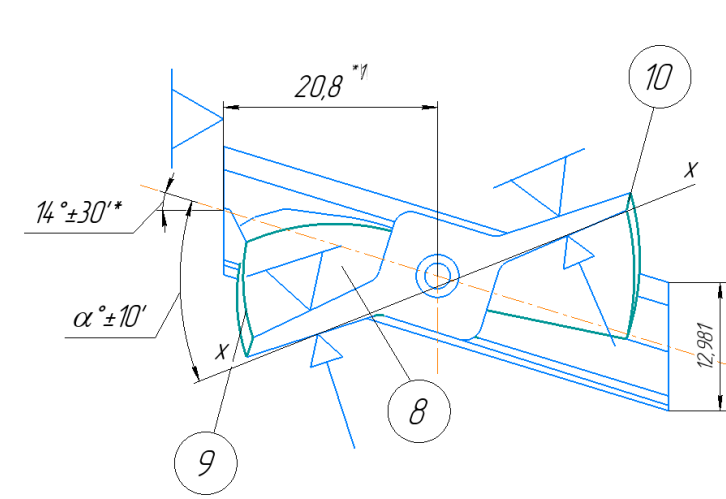
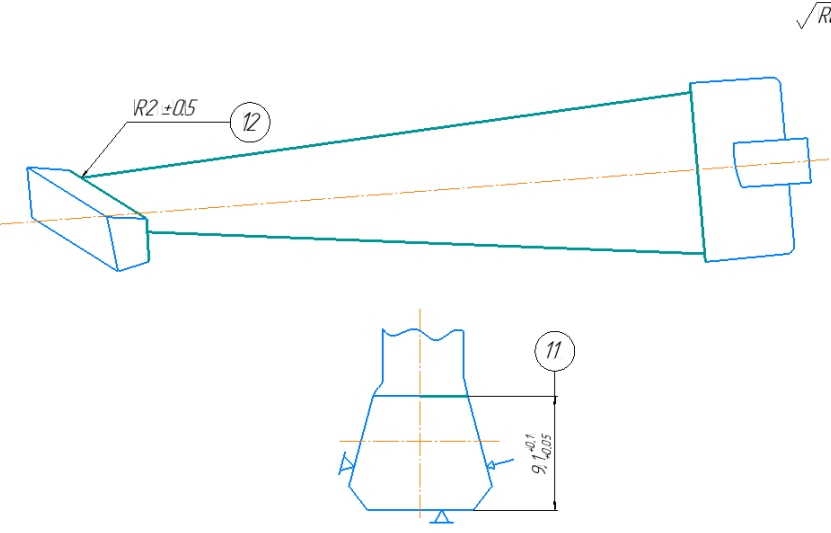


Рисунок 3.7 – Характеристика інструментальної оправки SK – 50.

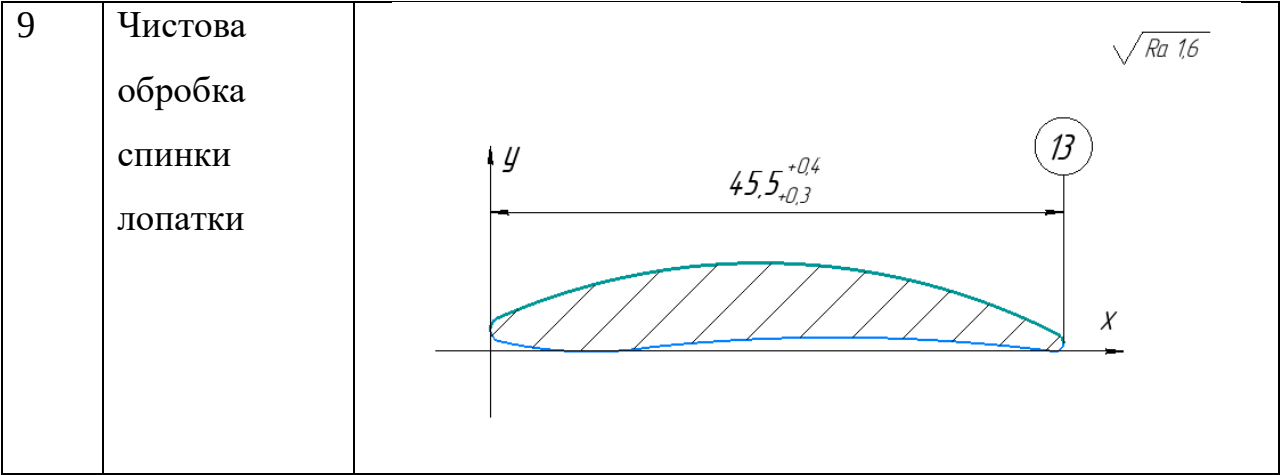
Таблиця 3.5 – Маршрут обробки профілю лопатки турбіни на вертикальному фрезерному верстаті з ЧПК.

№ Пер.	Зміст переходу	Ескіз
1-3	Закріплення заготовки. Підрізка вхідної та вихідної кромки.	

Продовження таблиці 3.5.

4, 5	Чорнова обробка профілю полички лопатки та	
6	Чорнова доробка профілю	
7, 8	Чистова обробка полички радіусів лопатки та	

Кінець таблиці 3.5.



На 10 переході лопатку встановлюють та затискають іншим боком, і обробляють аналогічно переходам 1 – 9.

Таблиця 3.6 – Технологічне оснащення для фрезерної обробки профілю лопатки турбіни.

Номер переходу	Інструмент
2, 3	Кінцева фреза Ø 8 R1 L105 Z3, матеріал P18K5Ф2
4, 5 (11, 12)	Кінцева фреза Ø10 R2.5 L65, Z4 матеріал P18K5Ф2
6 (13)	Кінцева фреза Ø 4 R0.5 L80 Z3, матеріал P12Ф4K5
7, 8 (14, 15)	Сферична фреза Ø4 R2 L50, Z4, матеріал P9K5-МП
9 (16)	Сферична фреза Ø6 R3 L45, Z4, матеріал P9K5-МП

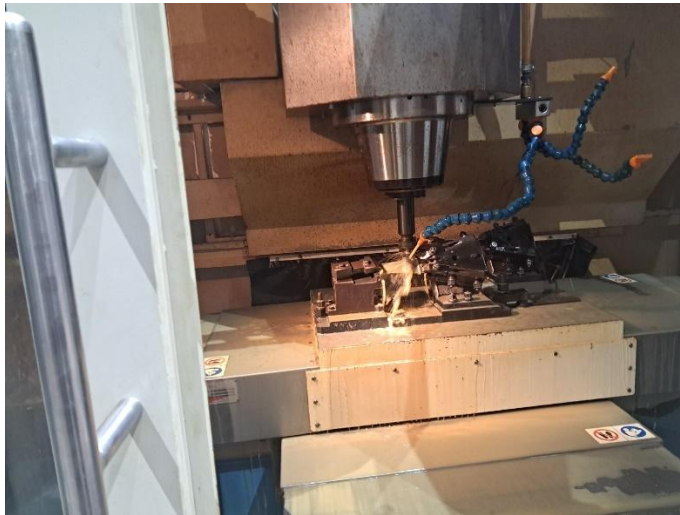


Рисунок 3.8 – Процес обробки лопатки турбіни на вертикальному фрезерному верстаті з ЧПК MC6104 – 13W

Таблиця 3.7 – Режими різання при обробці профілю лопатки (пера) на 4- осьовому фрезерному верстаті з ЧПК.

Номер переходу	Глибина різання, мм	Подача, мм/хв	Швидкість різання, м/хв	Частота обертання, об/хв	Потужність, кВт
2, 3	1.3	576	52.752	2100	0.136
4, 5 (11, 12)	0.5	540	65.940	2100	0.495
6 (13)	0.5	540	31.400	2500	0.155
7, 8 (14, 15)	0.2	368	56.520	4500	0.108
9 (16)	0.2	368	84.780	4500	0.172

3.5 Розробка більш ефективного методу обробки лопатки турбіни.

Для того щоб підвищити ефективність обробки лопатки турбіни пропонується замінити обробки лопатки на протяжному верстаті (обробка

хвостової частини) та на фрезерному вертикальному верстаті з ЧПК (обробка пера частини лопатки) на обробку одним 5-ти осьовим фрезерним верстатом з ЧПК.

Ця заміна сприяє підвищенню деяких показників, що робить обробку лопатки більш ефективною:

1) Скорочується час обробки, зменшення кількості налаштувань, переміщень між верстатами, та автоматизація багатьох процесів дозволяють суттєво зменшити загальний час на установку та базування заготовки.

2) Зменшуються похибки встановлення, обробка на одному верстаті виключає похибки, які виникають при перенесенні заготовки між різними верстатами.

3) Зменшується знос інструменту, завдяки оптимізованим траєкторіям руху ріжучого інструменту на ЧПК верстаті.

4) Підвищена якість обробки, 5-осьові верстати дозволяють досягти більш рівної поверхні за рахунок адаптивних траєкторій різання, особливо на складних профілях.

5) Зменшення часу простоїв, завдяки ЧПК більшість налаштувань та змін програм відбувається без участі оператора, що знижує час простоїв.

6) Гнучкість у виробництві, один 5-ти осьовий верстат може використовуватися для інших операцій, якщо змінити програму, що збільшує ефективність виробничих процесів.

7) Зниження енергоспоживання, один сучасний 5-ти осьовий верстат зазвичай споживає менше енергії, ніж два окремих верстати.

8) Такий перехід дозволяє значно оптимізувати виробничий процес, зменшити витрати, та загалом підвищити ефективність обробки лопатки турбіни, що особливо важливо для авіаційних та енергетичних потреб.

Для обробки було обрано п'яти координатний фрезерний верстат з ЧПК MC 673 – 51 (рис. 3.9), технічні характеристики якого наведені в таблиці 3.8. Верстат має лінійні осі X, Y, Z і дві поворотні осі A та B. На рисунку 3.10 показані основні вузли верстата, 1 – шпиндель, 2 –

інструментальна правка HSK – 63A з інструментом, 3 – поворотна вісь А, 4 – поворотна вісь В.



Рисунок 3.9 – П'яти осьовий фрезерний верстат з ЧПК MC 673 – 51

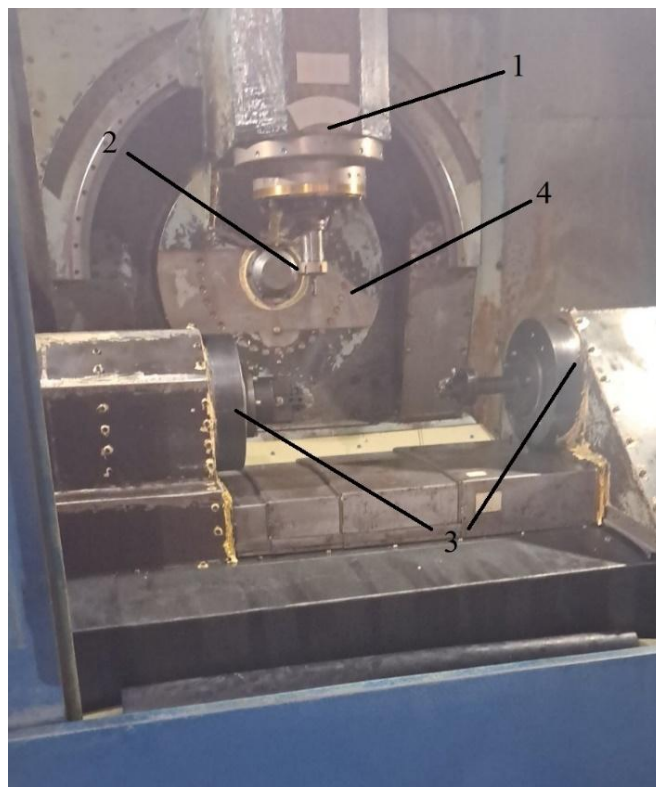


Рисунок 3.10 – Вузли 5-ти осьового фрезерного верстата з ЧПК MC 673 – 51

Таблиця 3.8 – Технічні характеристики фрезерного верстата з ЧПК
МС 673 – 51.

Параметр	Розмірність	Значення
Лінійні осі		X, Y, Z-Z ₁
Обертові осі		A-A ₁ , B
Переміщення осей:		
X	мм	від +60 до +740 (680)
Y	мм	±160 (320)
Z-Z ₁	мм	від +115 до +500 (385)
A, A ₁	градуси	±360°
B	градуси	від -50° до +50°
Швидкість осей		
X, Y, Z-Z ₁	мм/хв	від 0 до 30000
A, A ₁	градуси/хв	від 0 до 72000
B	градуси/хв	від 0 до 18000
Системи вимірювань		
X, Y, Z-Z ₁ (інкрементальна)		Heidenhain LS 187C
дискретність	мм	від 0.001 до 0.0005
A, A ₁ , B (абсолютна)		Heidenhain RCN 226
дискретність	градуси	0.0001°
Висота осі A-A ₁	мм	155
Потужність шпинделя:		
S1 100% при 1650 об/хв	кВт	20
S1 100% при 4500 об/хв	кВт	52
S1 100% при 18000 об/хв	кВт	20
Діапазон швидкості	об/хв	від 0 до 18000
Крутний момент шпинделя:		
від 0 до 1650 об/хв, 100%	Н·м	115.8

Кінець таблиці 3.8.

при 4500 об/хв, 100%	Н·м	110
при 18000 об/хв, 100%	Н·м	10.6
Конус шпинделя		HSK – A63
Тип конуса		DIN 69893
Сила затиску інструменту	кН	23
Максимальна маса інструменту	кг	5
Кількість інструментів на полиці	шт	6
Кількість полиць	шт	2

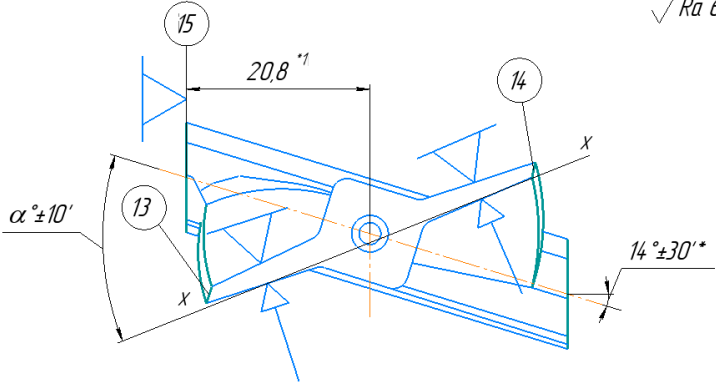
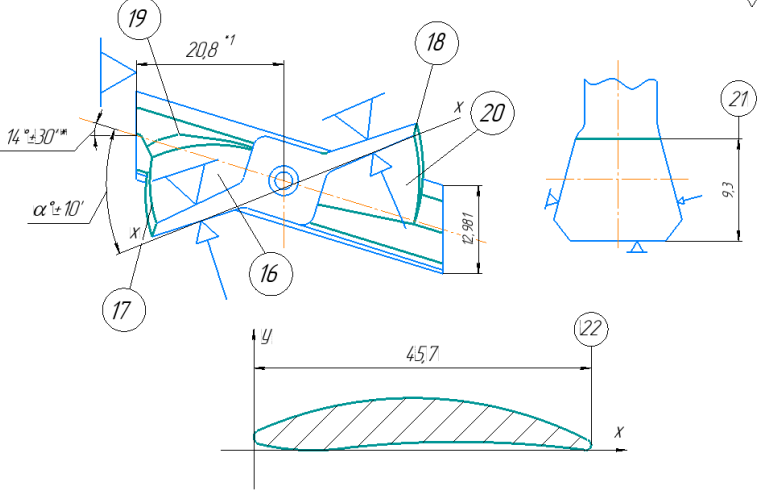
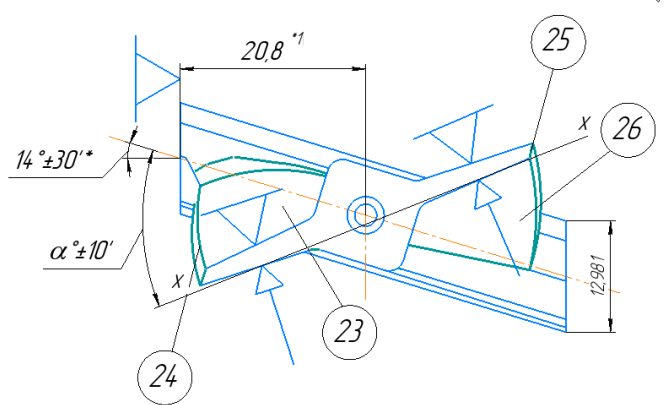
3.6 Розробка маршруту обробки на 5-ти координатному фрезерному верстаті.

На 5-ти координатному фрезерному верстаті буде оброблятися профіль лопатки турбіни (перо) та її хвостова частина тому при розробка. Задачами при розробці маршруту були виконання технологічних вимог щодо точності та якості виготовленої деталі, максимальна продуктивність та мінімальна собівартість виготовлення [14]. Маршрут обробки наведено в таблиці 3.9, припуск на профіль лопатки (перо) $0.7^{+0.5}$ мм на сторону (0.5 мм на чорнову та 0.2 мм на чистову обробки), припуск на хвостову частину $0.8^{+0.4}$ мм на сторону (0.6 мм на чорнову та 0.2 мм на чистову обробки).

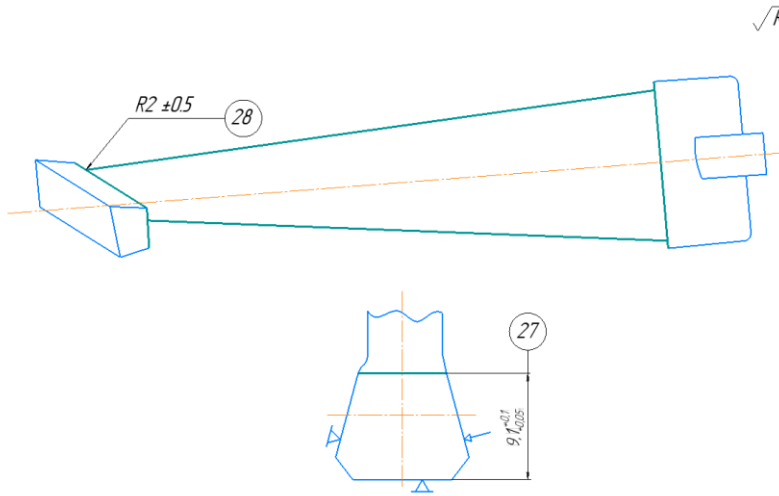
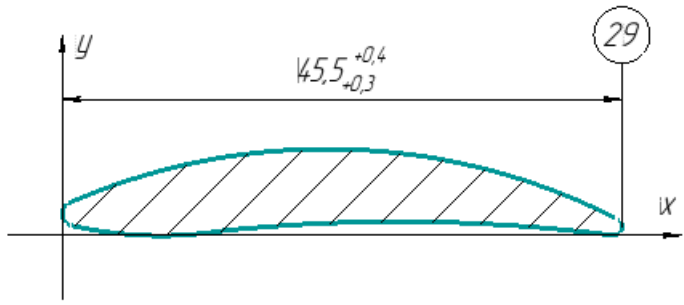
Таблиця 3.9 – Маршрут обробки лопатки турбіни на 5-ти осьовому фрезерному верстаті з ЧПК.

№ Пер.	Зміст переходу	Ескіз
1, 2	Закріплення заготовки. Чорнова обробка хвостової частини лопатки	
3	Чистова обробка хвостової частини	

Продовження таблиці 3.9.

4-6	Переустановлення заготовки. Підрізка кромки.	 Technical drawing of a turbine blade blank. Dimensions include a length of 20,8 mm, an angle of $\alpha \pm 10'$, and a tip angle of $14 \pm 30'$. A surface finish symbol $\sqrt{Ra 6,3}$ is indicated.
7, 8	Чорнова обробка профілю лопатки та полички	 Technical drawing of a turbine blade showing rough processing. Dimensions include a length of 20,8 mm, an angle of $\alpha \pm 10'$, a tip angle of $14 \pm 30'$, a height of 12,981 mm, and a width of 45,7 mm. A cross-section view shows a height of 9,3 mm. A surface finish symbol $\sqrt{Ra 6,3}$ is indicated.
9	Доробка профілю лопатки	 Technical drawing of a turbine blade showing final profile processing. Dimensions include a length of 20,8 mm, an angle of $\alpha \pm 10'$, a tip angle of $14 \pm 30'$, and a height of 12,981 mm. A surface finish symbol $\sqrt{Ra 6,3}$ is indicated.

Кінець таблиці 3.9.

10, 11	Чистова обробка полички та радіусів.	
12, 13	Чистова обробка профілю лопатки (спинки / корита)	

Інструменти обирались з урахуванням форми, розмірів та матеріалу оброблюваної поверхні, а також виду і вимог до точності та якості обробки, а також наявністю на виробництві Допоміжним устаткуванням слугує інструментальна оправка HSK – A63 DIN 69893, характеристика якої наведена на рисунку 3.11. Характеристика інструментального устаткування для обробки лопатки турбіни на 5-ти координатному верстаті з ЧПК наведено на рисунках 3.12, 3.13 та в таблиці 3.10.

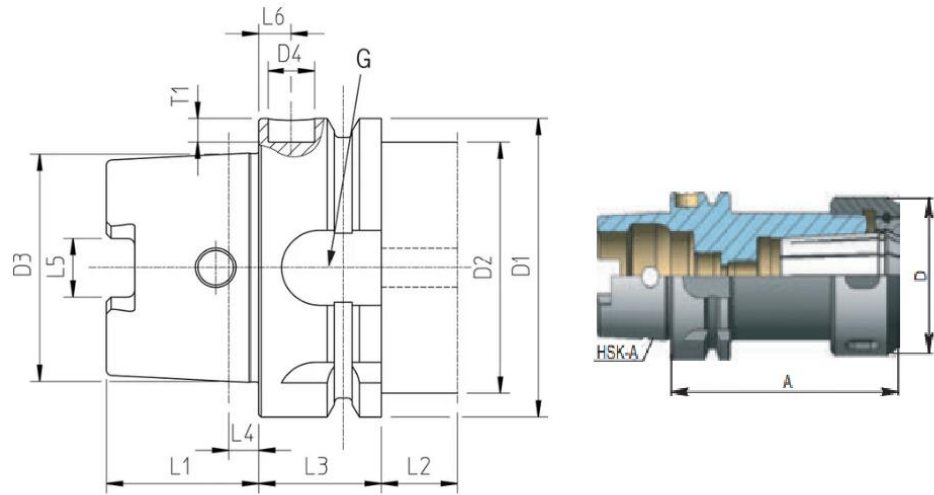


Рисунок 3.11 – Інструментальна оправка HSK – A63 DIN 69893

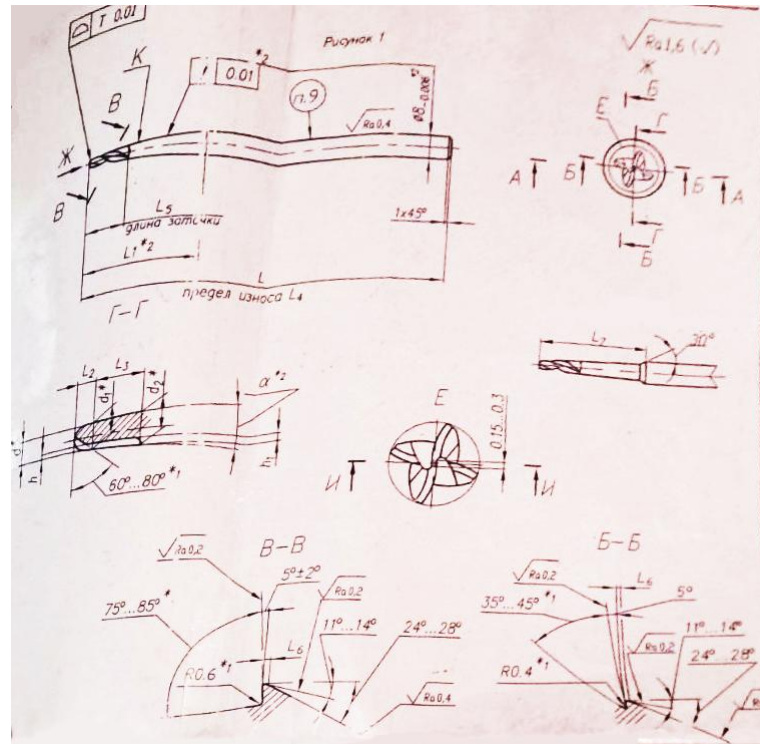
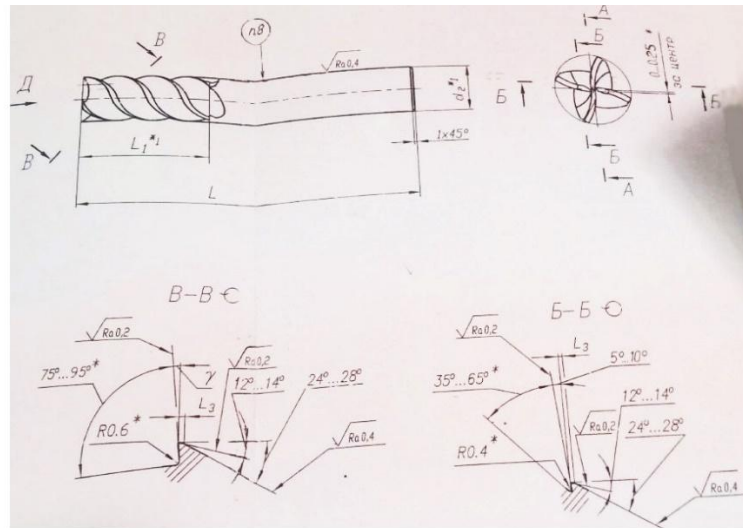
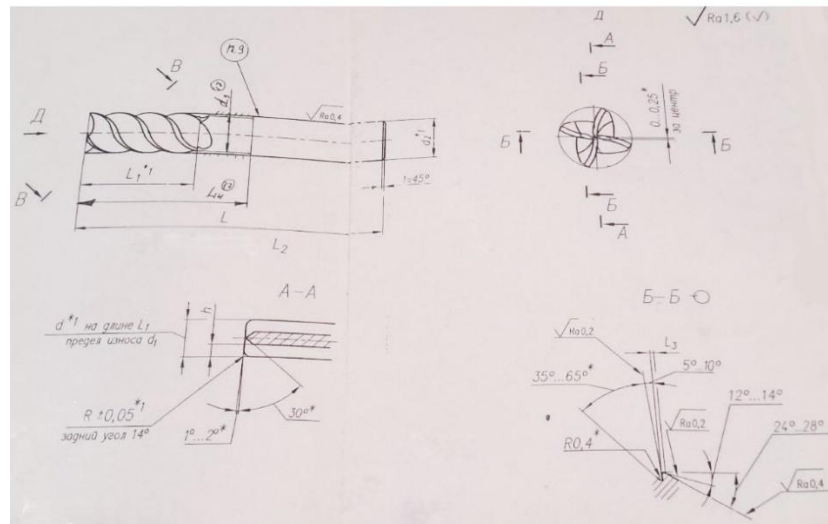


Рисунок 3.12 – Характеристика сферичних фрез які використовуються для обробки лопатки турбіни



а)



б)

а) – виконання I, б) – виконання II;

Рисунок 3.13 – Характеристика кінцевих фрез які використовуються для обробки лопатки турбіни

Кількість зубів у всіх фрез $z = 4$.

Таблиця 3.10 – Інструментальне устаткування для фрезерної обробки лопатки турбіни.

Номер переходу	Інструмент
2	Кінцева фреза Ø 8 L72, матеріал P6M5K5 (покриття нітрит титану TiN)
3	Кінцева фреза Ø 6 L63, матеріал P6M5
5, 6	Кінцева фреза Ø 8 R1 L50, матеріал P18K5Ф2
7, 8	Кінцева фреза Ø10 R2.5 L65, матеріал P18K5Ф2 (покриття $AlTiN$)
9	Сферична фреза Ø6 R3 L45, матеріал P12Ф4K5
10, 11	Сферична фреза Ø4 R2 L50, матеріал P9K5-МП
12, 13	Сферична фреза Ø6 R3 L45, матеріал P9K5-МП

3.7 Аналітичний розрахунок режимів різання фрезерної обробки лопатки турбіни на 5-ти осьовому фрезерному верстаті з ЧПК.

Розрахунок режимів різання включає в себе визначення швидкості різання V , м/хв [15]:

$$V = \frac{C_v \cdot D^{q_v}}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{u_v} \cdot Z^{p_v}} \cdot K_v, \quad (3.1)$$

де значення постійного коефіцієнта C_v і показників ступеня q_v , m , x_v , y_v , u_v , p_v визначаються за таблицями [Посилання на довідник];

T – період стійкості інструменту, призначається за табл. [15];

t – глибина різання, мм;

S_z – подача на зуб, мм/зуб, формула (3.3);

B – ширина фрезерування, мм;

Z – кількість зубів фрези;

K_v – поправочний коефіцієнт, який визначається за формулою (3.2).

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{iv}, \quad (3.2)$$

де K_{mv} , K_{nv} , K_{iv} – коефіцієнти, що враховують вплив оброблюваного матеріалу, стану поверхні і матеріалу фрези, відповідно, визначаються за табл. [15].

Глибину різання t , зазвичай, задають максимальною, рівною припуску на обробку. Виняток становлять випадки, коли потрібна підвищена точність і низька шорсткість обробленої поверхні, тоді обробку виконують у два або більше проходів [16].

Подачу на зуб S_z , мм/зуб визначаємо за таблицями.

$$S_z = S_{zT} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \quad (3.3)$$

де S_{zT} – табличне значення подачі, мм/зуб [17];

K_1 – поправочний коефіцієнт, що враховує матеріал інструменту;

K_2 – поправочний коефіцієнт, що враховує вид оброблюваної поверхні;

K_3 – поправочний коефіцієнт, що враховує геометрію інструменту.

Слід зазначити, що при обробці сферичною фрезою, при розрахунку режимів різання в деяких випадках використовується таке поняття як ефективний діаметр (рис. 3.14), він визначається так:

$$D_e = 2\sqrt{R^2 - (R - t)^2}, \quad (3.4)$$

де R – радіус сферичної фрези;

t – глибина різання.

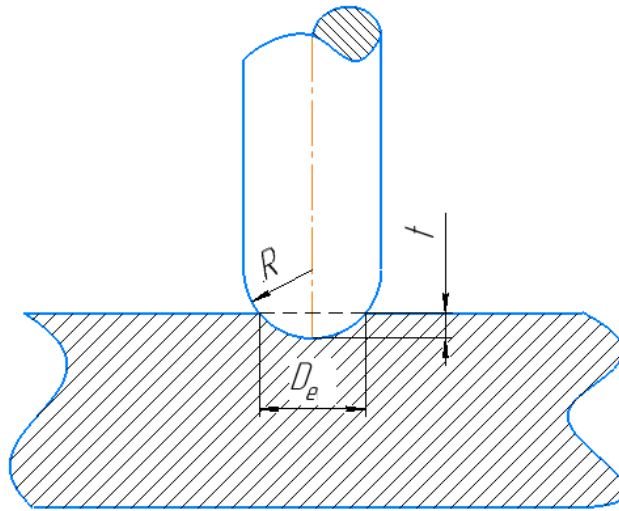


Рисунок 3.14 – Ефективний діаметр обробки сферичною фрезою

Визначення частоти обертання шпинделя n , об/хв за формулою:

$$n = \frac{V \cdot 1000}{\pi \cdot D}, \quad (3.5)$$

де V – швидкість різання, м/хв;

D – діаметр фрези, мм.

Уточнена швидкість різання V , м/хв визначається за формулою:

$$V = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{1000}. \quad (3.6)$$

Визначення хвилинної подачі $S_{хв}$, мм/хв:

$$S_{хв} = S_z \cdot n \cdot z, \quad (3.7)$$

де n – частота обертання шпинделя, об/хв;

z – кількість зубів фрези;

Визначення величини сили різання P_z , Н [15, 16]:

$$P_z = \frac{10C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{mp}, \quad (3.8)$$

де значення постійного коефіцієнта C_p і показників степенів визначаються за таблицями [15];

$K_{mp} = \left(\frac{\sigma_B}{750}\right)^{0.3}$ – поправочний коефіцієнт який враховує оброблюваний матеріал [15].

Визначення ефективної потужності різання $N_{\text{різ}}$, кВт верстата [16]:

$$N_{\text{різ}} = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60}. \quad (3.9)$$

Повинна виконуватись умова:

$$N_{\text{різ}} \leq N_{\text{шп}}, \quad (3.10)$$

де $N_{\text{шп}}$ – потужність шпинделя, кВт.

Розрахунок режимів різання для 5 та 6 переходу.

Зміст операції: Підрізання кромки лопатки.

Інструмент: Кінцева фреза Ø8 R1 L50.

Визначення швидкості різання (формула 3.1):

$$V = \frac{22.5 \cdot 8^{0.35}}{50^{0.27} \cdot 0.5^{0.27} \cdot 0.06^{0.48} \cdot 8^{0.3} \cdot 4^{0.1}} \cdot 0.81 = 57.541 \text{ м/хв}$$

Поправочний коефіцієнт K_v розраховується на всю обробку (формула 3.2), так як вплив оброблюваного матеріалу, $K_{mv} = 0.5$, стан поверхні, $K_{nv} = 0.8$, та матеріал інструменту, $K_{iv} = 0.3$ (швидкорізальна сталь) аналогічні на всіх переходах.

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{iv} = 0.95 \cdot 1 \cdot 0.9 = 0.855$$

Подача призначається $S_z = 0.06$ мм/зуб.

Визначення частоти обертання шпинделя (формула 3.5):

$$n = \frac{57.541 \cdot 1000}{3.14 \cdot 8} = 2290.66 \text{ об/хв}$$

Приймаємо частоту обертання $n = 2400$ об/хв.

Уточнення швидкості різання (формула 3.6):

$$V = \frac{2400 \cdot 3.14 \cdot 8}{1000} = 60.288 \text{ м/хв}$$

Хвилинна подача визначається за формулою 3.7:

$$S_{\text{хв}} = 0.06 \cdot 2400 \cdot 4 = 576 \text{ мм/хв}$$

Визначення величини сили різання (формула 3.8):

$$P_z = \frac{10 \cdot 82 \cdot 0.5^{0.75} \cdot 0.06^{0.6} \cdot 8^1 \cdot 4}{8^{0.86} \cdot 2400^0} \cdot 1.03 = 445.403 \text{ Н}$$

Визначення ефективної потужності різання верстата (формула 3.9):

$$N_{\text{різ}} = \frac{445.403 \cdot 60.288}{1020 \cdot 60} = 0.438 \text{ кВт}$$

Перевірка умови потужності (за 3.10):

$$N_{\text{різ}} \leq N_{\text{шп}}$$

$$0.438 \text{ кВт} \leq 20 \text{ кВт}$$

Умова виконується.

Аналогічним методом розраховуємо режими різання для інших переходів. Розраховані режими різання наведені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Режими різання при обробці лопатки турбіни.

Номер переходу	Глибина різання, мм	Подача, мм/хв	Швидкість різання, м/хв	Частота обертання, об/хв	Потужність, кВт
2	0.6	528	55.264	2200	0.514
3	0.2	360	84,780	4500	0.172
5, 6	1.3	576	60.228	2400	0.438
7, 8	0.5	576	75.360	2400	0.565
9	0.5	540	49.960	2700	0.355
10, 11	0.2	368	57.776	4600	0.171
12, 13	0.2	368	86.664	4600	0.175

4 АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ

В цій частині буде розглядатись оцінка підвищення ефективності обробки лопатки турбіни в зв'язку з переходом на обробку 5-ти осьовим верстатом замість обробки на 2-х верстатах (горизонтально протяжному та вертикально фрезерному з ЧПК).

4.1 Визначення показників для оцінки та порівняння ефективності методів обробки.

Основною метою є визначення переваг і недоліків запропонованого методу обробки порівняно з існуючим методом. Показники мають відображати технологічну, економічну та організаційну ефективність.

Пропоную оцінювати та порівнювати ефективність обробки за трьома основними групами.

1. Технологічні показники обробки:

- операційний час на обробку деталі;
- кількість установок та перестановок заготовки;
- гнучкість (можливість обробки складних форм, преналаштування верстата для обробки іншого типу деталей).

2. Економічні показники:

- вартість обладнання та інструменту;
- енерговитрати при обробці;
- завантаження виробничих площ обладнанням.

3. Організаційні показники:

- обслуговування верстатного обладнання;

- навчання операторів для роботи з обладнанням.

Групи були обрані з урахуванням того, що вони безпосередньо впливають на ефективність обробки, в нашому випадку лопатки турбіни. Технологічні показники обрані через їх вплив на якість виготовлення лопаток. Зокрема, час обробки та кількість установок впливають на точність та продуктивність. Економічні показники дозволяють оцінити фінансову ефективність та перспективи застосування кожного методу. А організаційні показники враховують зручність інтеграції нових методів на виробництві.

Методика збору даних для аналізу кожного показника буде представляти собою вимірювання або розрахунок параметрів для обох методів, збір довідкових даних щодо середніх витрат (наприклад для інструменту, або часу на переналадку), оцінку суб'єктивних показників через експертну оцінку.

4.2 Технологічні показники обробки.

Оцінка та порівняння часу обробки деталі.

За наданою інформацією на підприємстві:

- час обробки хвостової частини лопатки на протяжному верстаті займає $t_{\text{прот.}(обр.)} = 80$ хв;
- час обробки профілю лопатки (пера) на 4-х осьовому вертикальному фрезерному верстаті з ЧПК займає $t_{4x(обр.)} = 150$ хв.

Загальний час обробки першим методом (обробка лопатки турбіни на двох верстатах, протяжному та фрезерному) займає $t_{\text{метод } 1} = 230$ хв, це без урахування переміщення заготовки між верстатами.

Щодо часу обробки на 5-ти осьовому фрезерному верстаті з ЧПК то будемо рахувати, що обробка пера лопатки, буде займати той же час, що і на

4-х осьовому, але з врахуванням того, що установка і переустановка заготовки на 5-ти координатному верстаті займає менший час, тому треба вирахувати їх різницю, а також кількість замін інструменту:

$$t_{\text{різ(уст)}} = t_{4\text{х(уст)}} - t_{5\text{ти(уст)}}, \text{ хв} \quad (4.1)$$

де $t_{4\text{х(уст)}}$ – час установки на 4-х осьовому фрезерному верстаті з ЧПК;

$t_{5\text{ти(уст)}}$ – час установки на 5-ти осьовому фрезерному верстаті з ЧПК.

$$t_{\text{різ(уст)}} = 20 - 10 = 10 \text{ хв.}$$

$$t_{\text{різ(інстр)}} = |t_{4\text{х(інстр)}} \cdot j_{4\text{х(перо)}} - t_{5\text{ти(інстр)}} \cdot j_{5\text{ти(перо)}}|, \quad (4.2)$$

де $t_{4\text{х(інстр)}}$, $t_{5\text{ти(інстр)}}$ – час заміни інструменту на 4-х та 5-ти осьових фрезерних верстатах.

$j_{4\text{х(перо)}}$ – кількість переходів зі зміною інструментів при обробці профілю пера на 4-х осьовому фрезерному верстаті з ЧПК.

$j_{5\text{ти(перо)}}$ – кількість переходів зі зміною інструментів при обробці профілю пера на 5ти осьовому фрезерному верстаті з ЧПК.

$$t_{\text{різ(інстр)}} = |0.1 \cdot 9 - 0.1 \cdot 5| = 0.4 \text{ хв.}$$

Тоді обробка пера лопатки на 5-ти координатному верстаті буде займати:

$$t_{5\text{ти(перо)}} = t_{4\text{х(обр.)}} - t_{\text{різ(уст)}} - t_{\text{різ(інстр)}}. \quad (4.3)$$

$$t_{5\text{ти(перо)}} = 150 - 10 - 0.4 = 139.6 \text{ хв.}$$

Час обробки хвостової частини лопатки турбіни $t_{5\text{ти(хв.)}}$ («ластівчин хвіст») розраховується аналітичним методом.

Час обробки поверхні визначається $t_{\text{пов}}$, хв [19]:

$$t_{\text{пов}} = \frac{L_{\text{заг}}}{S_{\text{хв}}} \cdot n \cdot i, \quad (4.4)$$

де $L_{\text{заг}}$, мм – загальна довжина обробки (формула 4.5);

$S_{\text{хв}}$, мм/хв – хвилинна подача;

n – кількість проходів (формула 4.6);

i – коефіцієнт який враховує кількість однакових за розміром чи симетричних поверхонь.

$$L_{\text{заг}} = L + L_{\text{вріз}} + L_{\text{вих}}, \quad (4.5)$$

де $L_{\text{вріз}} = \sqrt{(t^2 + D^2)}$ – глибина врізання фрези, мм, t – глибина різання, D – діаметр фрези;

$L_{\text{вих}} = 0.6D$ – довжина виходу фрези, мм [19].

$$n = \frac{W}{D \cdot (1-k)}, \quad (4.6)$$

де W – ширина оброблюваної поверхні, мм;

k – коефіцієнт перекриття між проходами (0.2...0.5).

Розрахунок часу чорнової обробки хвостової частини на 5-ти координатному фрезерному верстаті з ЧПК.

Поверхні 2, 3 (таблиця 3.9).

Визначення величини врізання (формула 4.5):

$$L_{\text{вріз}} = \sqrt{(0.6^2 + 8^2)} = 8.02 \text{ мм.}$$

Визначення кількості проходів (формула 4.6):

$$n = \frac{8.1}{8 \cdot (1 - 0.35)} \approx 2.$$

Час обробки 2 та 3 поверхні визначається (формула 4.4):

$$t_{\text{пов } 2,3} = \frac{58 + 8.02 + 4.8}{528} \cdot 2 \cdot 2 = 0.53 \text{ хв.}$$

Для поверхні 5 (таблиця 3.9).

Кількість проходів:

$$n = \frac{2.61}{8 \cdot (1 - 0.35)} \approx 1.$$

Час обробки поверхні 5:

$$t_{\text{пов } 5} = \frac{58 + 8.02 + 4.8}{528} \cdot 1 \cdot 2 = 0.26 \text{ хв.}$$

Для поверхні 6 (таблиця 3.9).

Кількість проходів:

$$n = \frac{9.2}{8 \cdot (1 - 0.35)} \approx 2.$$

Час обробки поверхні 5:

$$t_{\text{пов } 5} = \frac{58 + 8.02 + 4.8}{528} \cdot 2 \cdot 1 = 0.26 \text{ хв.}$$

Загальний час на чорнову обробку хвостовика:

$$t_{\text{чор.хв.}} = t_{\text{пов 2,3}} + t_{\text{пов 5}} + t_6 = 0.53 + 0.26 + 0.26 = 1.05 \text{ хв.} \quad (4.7)$$

Аналогічним методом розраховується час на чистову обробку хвостової частини $t_{\text{чис.хв.}} = 2.07 \text{ хв.}$

Час на обробку хвостової частини складається $t_{5\text{ти(хв.)}}$, хв:

$$t_{5\text{ти(хв.)}} = t_{\text{чор.хв.}} + t_{\text{чис.хв.}} + t_{5\text{ти(уст)}} + t_{5\text{ти(інстр)}} \cdot j_{5\text{ти(хв.)}}, \quad (4.8)$$

де $j_{5\text{ти(хв.)}}$ – кількість переходів зі зміною інструментів при обробці хвостової частини.

$$t_{5\text{ти(хв.)}} = 1.05 + 2.07 + 10 + 0.1 \cdot 2 = 13.32 \text{ хв.}$$

Час обробки другим методом буде визначатись:

$$t_{\text{метод 2}} = t_{5\text{ти(обр.)}} = t_{5\text{ти(перо)}} + t_{5\text{ти(хв.)}}. \quad (4.9)$$

$$t_{\text{метод 2}} = 139.6 + 13.32 = 152.92 \text{ хв.}$$

$$t_{\text{метод 1}}(230 \text{ хв}) > t_{\text{метод 2}}(152.92 \text{ хв})$$

Порівнявши час обробки лопатки турбіни різними методами приходимо до висновку, що другий розроблений метод обробки займає менше часу, що підвищує продуктивність обробки.



Рисунок 4.1 – Оцінка часу обробки лопатки турбіни різними методами

Кількість установок та перестановок заготовки.

Метод 1 (горизонтально протяжний + 4-осьовий фрезерний верстат з ЧПК):

- установка на протяжний верстат для обробки хвостової частини;
- перестановка на 4-осьовий верстат для обробки профілю пера;
- додаткова перестановка на 4-осьовому фрезерному верстаті для обробки іншого боку пера лопатки.

Загалом: 3 установки/перестановки.

Метод 2 (5-осьовий фрезерний верстат з ЧПК):

- установка на 5-осьовий верстат для обробки хвостової частини.
- перестановка для обробки пера лопатки.

Загалом: 2 установки/перестановки.

Кількість установок і перестановок заготовки впливає на загальний час обробки, точність виготовлення та стабільність виробничого процесу.

Кожна додаткова установка або перестановка збільшує ризик накопичення похибок у вимірюванні та налаштуванні координат. Невеликі відхилення у точності позиціонування можуть вплинути на відповідність деталі технічним вимогам, особливо в складних геометричних елементах. Більша кількість установок призводить до додаткового часу на переналаштування пристроїв і перевірку точності.

Гнучкість верстатного обладнання.

Протяжний верстат:

- Обмежена гнучкість, протяжні верстати виконують обмежену кількість операцій, вони мають низьку універсальність для інших видів обробки.
- Висока продуктивність, у серійному виробництві цей верстат дозволяє досягти стабільної якості та швидкої обробки однакових деталей.
- Недоліком є переналаштування або використання верстата для інших типів деталей, це вимагає заміни інструменту (протяжки), що пов'язано зі значними витратами часу та ресурсів.

Фрезерні верстати.

4-осьовий фрезерний верстат:

- Придатний для виконання більш широкого спектру операцій, ніж протяжний верстат, але вимагає кількох установок для обробки складних деталей.
- Підходить для масового виробництва або виготовлення деталей із простою геометрією.
- 5-осьовий фрезерний верстат:
- Має найвищу гнучкість завдяки можливості обробки всіх поверхонь заготовки в одній установі.
- Легко адаптується до виготовлення деталей різної складності, що особливо важливо для малосерійного або індивідуального виробництва.

Гнучкість верстатного обладнання є критично важливою для сучасного виробництва, оскільки вона покращує ефективність використання ресурсів, підвищує якість продукції та здатність підприємства адаптуватися до змін на ринку. Це ключовий фактор для підприємств, які прагнуть забезпечити стабільний розвиток і підвищення конкурентоспроможності.

4.3 Економічні показники.

Економічна ефективність обробки деталей значною мірою залежить від таких показників, як вартість обладнання та інструменту, енерговитрати, завантаження виробничої площі та витрати на технічне обслуговування.

Вартість обладнання та інструменту.

Аналіз вартості обладнання та інструменту є аспектом оцінки економічної ефективності методів обробки. Вартість верстатів, які використовують для обробки, і необхідний інструментарій впливають на загальні капітальні витрати, рентабельність виробництва та можливість масштабування виробничих процесів. Порівняння цих витрат дозволяє обґрунтувати вибір оптимального технологічного рішення.

Вартість протяжного горизонтального верстата будемо оцінювати середньою ціною моделі верстата (горизонтальний протяжний верстат 7523) на ринку. Щодо оцінки вартості 4-х осьового та 5-ти осьового фрезерного верстата з ЧПК то оцінка буде робитись за подібними верстатами зі схожими характеристиками, так як за такими ж моделями оцінка неможливо в зв'язку з тим, що дані моделі верстатів виготовлені або модернізовані на підприємстві.

Таблиця 4.1 – Оцінка та порівняння верстатів для обробки лопатки турбіни [20, 21].

Метод 1	
Верстат	Ціна, грн
Горизонтально протяжний верстат 7523	140000 – 180000

Кінець таблиці 4.1.

4-х осьовий фрезерний верстат з ЧПК MC6104 – 13W	800000 – 1500000
Метод 2	
Верстат	Ціна, грн
5-ти осьовий фрезерний верстат з ЧПК MC 673 – 51	2000000 – 5000000

Примітка: Вартість зазначеного обладнання значно варіюється залежно від виробника, року випуску, стану (новий чи вживаний) та умов постачання. Для точного визначення вартості рекомендується звернутися до постачальників.



Рисунок 4.2 – Оцінка вартості верстатів для різних методів обробки

Аналіз показав, що первинні інвестиції в обладнання суттєво відрізняються між методами. Використання 5-осьового фрезерного верстату вимагає більшого капіталовкладення, але дозволяє зменшити кількість операцій і підвищити гнучкість виробництва.

Оцінка вартості інструментального устаткування буде проводитись за ріжучими інструментами які використовуються для фрезерної обробки таблиця 4.2, з урахуванням того, що ще є додаткові витрати на протяжки,

оцінити вартість протяжок складно, так як це спеціалізований інструмент який виготовляється для конкретної конфігурації деталей.

Таблиця 4.2 – Інструмент який використовується для фрезерної обробки лопатки турбіни різними методами.

Метод 1		Метод 2	
4-х осьовий вертикальний фрезерний верстат з ЧПК MC6104 – 13W		5-ти осьовий фрезерний верстат з ЧПК MC 673 – 51	
Номер переходу	Характеристика інструмент	Номер переходу	Характеристика інструмент
2, 3	Кінцева фреза $\varnothing 8$ R1 L105 Z3, матеріал P18K5Ф2	2	Кінцева фреза $\varnothing 8$ L72, матеріал P6M5K5 (покриття нітрит титану TiN)
4, 5 (11, 12)	Кінцева фреза $\varnothing 10$ R2.5 L65, Z4 матеріал P18K5Ф2	3	Кінцева фреза $\varnothing 4$ L63, матеріал P6M5
6 (13)	Кінцева фреза $\varnothing 4$ R0.5 L80 Z3, матеріал P12Ф4K5	5, 6	Кінцева фреза $\varnothing 8$ R1 L50, матеріал P18K5Ф2
7, 8 (14, 15)	Сферична фреза $\varnothing 4$ R2 L50, Z4, матеріал P9K5-МП	7, 8	Кінцева фреза $\varnothing 10$ R2.5 L65, матеріал P18K5Ф2 (покриття AlTiN)
9 (16)	Сферична фреза $\varnothing 6$ R3 L45, Z4, матеріал P9K5-МП	9	Сферична фреза $\varnothing 6$ R3 L45, матеріал P12Ф4K5
-	-	10, 11	Сферична фреза $\varnothing 4$ R2 L50, матеріал P9K5-МП
-	-	12, 13	Сферична фреза $\varnothing 6$ R3 L45, матеріал P9K5-МП

При оцінці та порівнянні інструменту (фрез) не будуть використовуватись фрези для 4, 5 (11, 12), 7, 8 (14, 15), 9 (16) переходів першого методу та переходи 7 – 13 другого методу обробки так як вони схожі.

Таблиця 4.3 – Оцінка та порівняння інструменту для фрезерної обробки лопатки турбіни різними методами [22 – 24].

Метод 1		
Номер переходу	Характеристика інструменту	Ціна, грн
2, 3	Кінцева фреза $\varnothing 8$ R1 L105 Z3, матеріал P18K5Ф2	60 – 120
6 (13)	Кінцева фреза $\varnothing 4$ R0.5 L80 Z3, матеріал P12Ф4K5	200 – 250
Метод 2		
Номер переходу	Характеристика інструменту	Ціна, грн
2	Кінцева фреза $\varnothing 8$ L72, матеріал P6M5K5 (покриття нітрит титану TiN)	150 – 205
3	Кінцева фреза $\varnothing 6$ L63, матеріал P6M5	50 – 110
5, 6	Кінцева фреза $\varnothing 8$ R1 L50, матеріал P18K5Ф2	140 – 180

Примітка: Ці дані є орієнтовними й можуть змінюватися залежно від постачальника, якості матеріалу та додаткових характеристик інструмента.

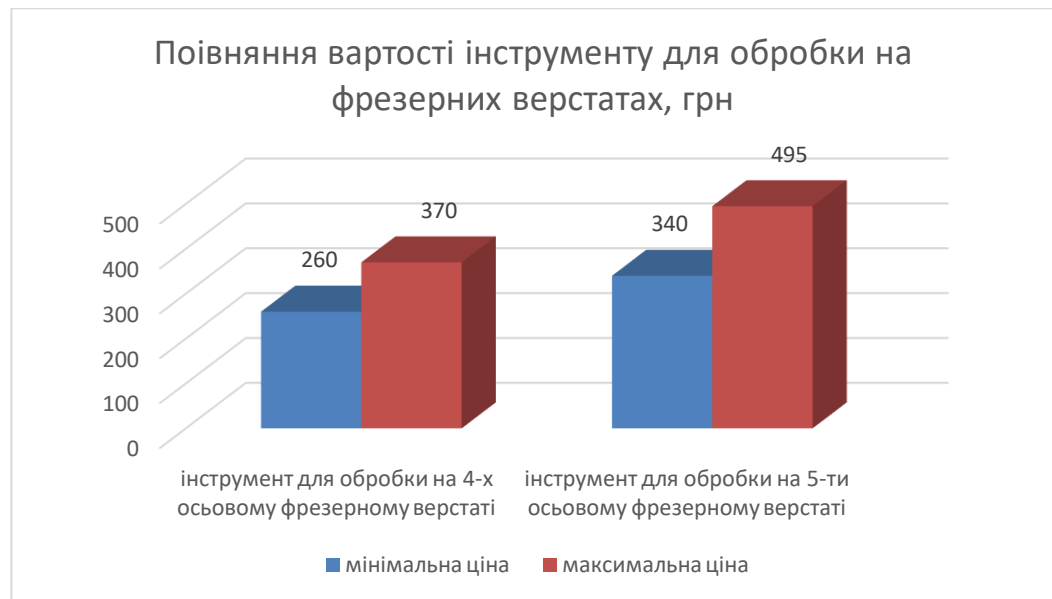


Рисунок 4.3 – Оцінка та порівняння вартості інструментів для обробки на фрезерних верстатах з ЧПК

З аналізу та порівняння вартості інструментального устаткування для фрезерної обробки лопатки турбіни, видно, що при другому методі вартість на інструмент більше. Але якщо враховувати вартість на проектування та виготовлення протяжок, які використовуються при обробці хвостової частини лопатки в першому методі то вартість інструментального устаткування першого методу буде значно перевищувати вартість при другому методі обробки. Також слід зазначити, що протяжки дорожчі за одиницю, але мають більший ресурс, натомість фрези значно дешевші, але їх споживання може бути більшим через частину заміни.

Енерговитрати обробки.

Оцінка та порівняння енерговитрат буде виконуватись порівнянням витрат електроенергії на обробку при різних методах.

Визначення середньої ефективної потужності різання $N_{\text{сер}}$, кВт:

$$N_{\text{сер}} = \frac{\sum_1^p N_{\text{різ}}}{p}, \quad (4.10)$$

де $N_{\text{різ}}$ – ефективна потужність різання переходу;

p – кількість переходів обробки.

Таблиця 4.4 – Ефективна потужність різання при фрезеруванні.

Метод 1		Метод 2	
4-х осьовий вертикальний фрезерний верстат з ЧПК MC6104 – 13W		5-ти осьовий фрезерний верстат з ЧПК MC 673 – 51	
Номер переходу	Ефективна потужність різання, кВт	Номер переходу	Ефективна потужність різання, кВт
2, 3	0.136	2	0.514
4, 5 (11, 12)	0.495	3	0.172
6 (13)	0.155	5, 6	0.438
7, 8 (14, 15)	0.108	7, 8	0.565
9 (16)	0.172	9	0.355
-	-	10, 11	0.171
-	-	12, 13	0.175

Визначення кількості використаної електроенергії $N_{\text{елктр}}$, кВт·год:

$$N_{\text{елктр}} = \frac{N_{\text{сер}} \cdot t_{(\text{обр.})}}{60} \quad (4.11)$$

Для фрезерної обробки на 4-х осьовому фрезерному верстаті середня ефективна потужність різання визначається (формула 4.10):

$$\begin{aligned}
 N_{\text{сер}(4x)} &= \frac{0.136 \cdot 2 + 0.495 \cdot 4 + 0.155 \cdot 2 + 0.108 \cdot 4 + 0.172 \cdot 2}{14} \\
 &= 0.238, \text{ кВт.}
 \end{aligned}$$

Кількість використаної електроенергії для фрезерної обробки на 4-х осьовому фрезерному верстаті визначається (формула 4.11):

$$N_{\text{елктр}(4x)} = \frac{0.238 \cdot 150}{60} = 0.595, \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Аналогічним методом визначаємо кількість електроенергії для обробки на 5-ти осьовому фрезерному верстаті. Результати розрахунку наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати розрахунку витрат електроенергії при обробці.

	4-х осьовий вертикальний фрезерний верстат з ЧПК MC6104 – 13W	5-ти осьовий фрезерний верстат з ЧПК MC 673 – 51
$N_{\text{елктр}}$	0.595 кВт·год	0.867 кВт·год

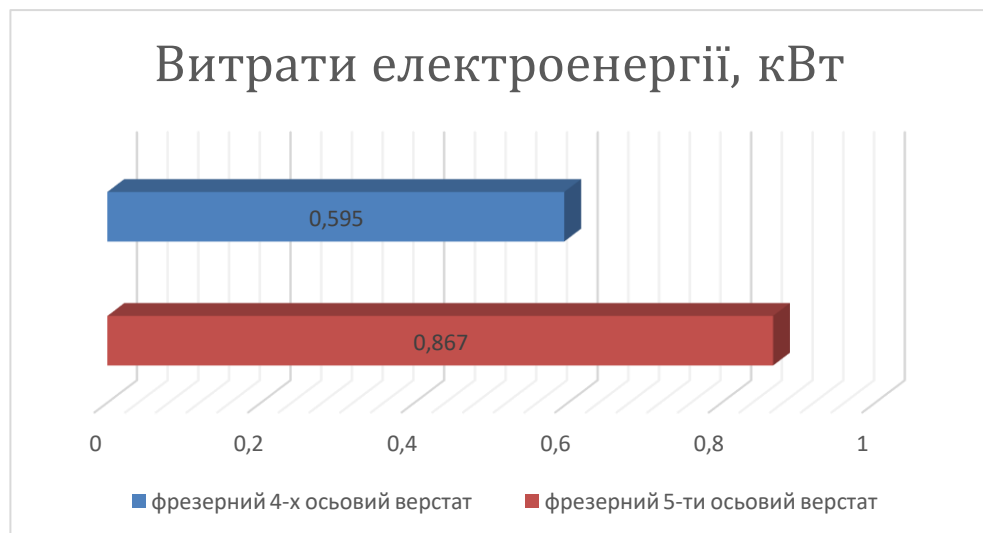


Рисунок 4.4 – Витрати електроенергії на обробку різанням при фрезеруванні на 4-х та 5-ти осьових верстатах

З порівняння видно, що при фрезерній обробці на 5-ти осьовому верстаті витрата електроенергії більше ніж на 4-х осьовому, але тут не враховувались витрати на обробку протягуванням. Зазвичай при протягуванні сили різання значно більші ніж при фрезеруванні, тому будемо вважати, що витрати на електроенергію якщо не рівні то при першому методі більші ніж при другому. Слід зазначити, що при оцінці та порівнянні враховувались витрати тільки на процес різання, хоча вузів споживання електроенергії значно більше (освітлення зони обробки, подача МОР, тощо).

Завантаження виробничих площ обладнанням.

Оцінка та порівняння завантаження виробничих площ буде проводитись за габаритними розмірами верстатів та периферійних пристроїв.

Горизонтально протяжний верстат 7523:

- габарити верстата складають (Д х Ш х В) 6000 x 2000 x 1750, мм.

Фрезерний 4-х осьовий верстат з ЧПК MC6104 – 13W:

- габарити верстата складають (Д х Ш х В) 2500 x 3500 x 3000, мм;
- електрошафа 1500 x 500 x 1800, мм;
- агрегат очищення МОР 2080 x 935 x 1750, мм;
- система охолодження води 715 x 715 x 1375, мм.

Фрезерний 5-ти осьовий верстат з ЧПК MC 673 – 51:

- габарити верстата складають (Д х Ш х В) 2500 x 2500 x 3000, мм;
- електрошафа 2400 x 600 x 2200, мм;
- агрегат очищення МОР 2080 x 935 x 1750, мм;
- система витяжки та очищення туману МОР 600 x 750 x 1135;
- система охолодження води 715 x 715 x 1375, мм.

Для визначення площі, зайнятої обладнанням, обчислимо площу кожного верстата разом із його периферійними пристроями. Площа розраховується як добуток довжини та ширини (в метрах) кожного пристрою.

Площа для горизонтально протяжного верстата визначається:

$$S_{\text{прот}} = 6 \cdot 2 = 12, \text{ м}^2.$$

Площа для фрезерного 4-х осьового верстата визначається:

$$S_{4\text{х}} = 2.5 \cdot 3.5 + 1.5 \cdot 0.5 + 2.08 \cdot 0.935 + 0.715 \cdot 0.715 = 11.95, \text{ м}^2.$$

Площа для фрезерного 5-ти осьового верстата визначається:

$$\begin{aligned} S_{5\text{ти}} &= 2.5 \cdot 2.5 + 2.4 \cdot 0.6 + 2.08 \cdot 0.935 + 0.715 \cdot 0.715 + 0.6 \cdot 0.75 \\ &= 10.59, \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Таким чином при першому методі обробки комбінація протяжного та 4-х осьового фрезерного верстатів з периферійними пристосуваннями займають площу:

$$S_{\text{прот}} + S_{4\text{х}} = 12 + 11.95 = 23.95, \text{ м}^2.$$

Водночас при другому методі обробки, 5-ти осьовий фрезерний верстат займає площу $S_{5\text{ти}} = 10.59, \text{ м}^2$, що є меншим показником.

Це свідчить про ефективніше використання виробничих площ у разі переходу на обробку другим методом з використанням 5-ти осьового фрезерного верстата з ЧПК. Така оптимізація площі дозволяє підприємству звільнити місце для інших виробничих процесів або обладнання, що підвищує загальну ефективність використання виробничого простору.



Рисунок 4.5 – Графік завантаження виробничих площ при різних методах обробки

4.4 Організаційні показники.

Обслуговування верстатного обладнання.

Обслуговування обладнання є одним із ключових факторів, які впливають на його продуктивність і точність.

У разі використання протяжних верстатів основні витрати та зусилля спрямовані на підтримання ріжучого інструменту в робочому стані, так як навіть незначні зміни можуть істотно вплинути на якість оброблюваних поверхонь. Також обслуговування самого верстату забезпечує регулярне налаштування його механізмів та зміщення напрямних, щоб запобігти втраті точності.

Фрезерні верстати, особливо 4-осьові та 5-осьові з ЧПК, потребують ретельнішого і дорожчого обслуговування через надійність їхньої електронної конструкції та компонентів. Можливо проводити періодичне калібрування, заміну мастильних матеріалів, перевіряти стан шпинделя та

електронних систем. Зношення шпинделя, сервоприводів та системи ЧПК може призвести до значних простоїв і високих витрат на ремонт. Однак вони часто оснащені автоматизованими системами діагностики, які можуть виявити несправності на ранніх етапах, зменшуючи ризики аварійного простору.

Загалом, протяжний верстат є менш витратним у обслуговуванні, але його вузька спеціалізація може створювати додаткові організаційні складнощі, якщо виробництво змінює номенклатуру деталей.

Навчання операторів для роботи з обладнанням.

Навчання персоналу для роботи з іншими типами верстатів є необхідною складовою організації виробничого процесу. Вимоги до підготовки операторів суттєво різняться залежно від складності обладнання.

Протяжні верстати потребують мінімальної підготовки операторів, оскільки їх функціонування є відносно простим. Оператори вивчають базові процедури налаштування та роботи в короткі терміни.

Для роботи на фрезерних верстатах з ЧПК необхідні більш ґрунтовні знання. Оператори 4-осьових верстатів мають опанувати основи програмування ЧПК, роботи з САМ-системами та налаштування складних траєкторій обробки. У разі використання 5-осьових верстатів рівень підготовки має бути ще вищим. Оператори повинні розуміти особливості просторового позиціонування інструмента, складних операцій переналаштування верстата та інтеграції САМ-систем у виробничий процес.

Інвестиції в навчання операторів для роботи з сучасними фрезерними верстатами значно вище, ніж для протяжних верстатів. Проте вони забезпечують гнучкість у роботі та вищу якість обробки, що є критичним місцем для конкурентоспроможності підприємства.

Організаційні аспекти обслуговування та навчання безпосередньо впливають на ефективність виробництва. Використання простих у роботі та обслуговуванні протяжних верстатів може бути економічно вигідним для стабільного виробництва деталей однієї номенклатури. Натомість фрезерні

верстати з ЧПК, хоча й вимагають більших витрат на навчання персоналу та обслуговування, дозволяють швидко адаптувати виробничий процес до нових завдань, що є перевагою для підприємств зі змінними виробничими потребами.

4.5 Висновки щодо аналізу та оцінки ефективності обробки.

Аналіз ефективності різних методів обробки турбінної лопатки дозволив зробити висновки, що використання протяжного верстата у поєднанні з 4-осьовим фрезерним верстатом забезпечує високу точність окремих операцій, але має більший час обробки, зокрема через необхідність перенесення заготовки між верстатами та додаткові налаштування. Водночас, використання 5-осьового фрезерного верстата дозволяє об'єднати всі етапи обробки, що знижує кількість установок і підвищує загальну точність завдяки мінімізації накопичення похибок.

З економічної точки зору, початкові витрати на придбання 5-осьового верстата є вищими, проте вони компенсуються зменшенням витрат на спеціалізовані інструменти, такі як протяжки, та скороченням часу простою. Енерговитрати при обробці також знижуються завдяки скороченню кількості верстатів і операцій.

Організаційні аспекти показали, що обслуговування протяжного і 4-осьового верстатів є менш складним, однак їх комбінація вимагає більшого простору у виробничому цеху. Використання 5-осьового верстата зменшує займану площу і спрощує виробничий процес, хоча вимагає залучення кваліфікованих операторів і спеціалістів для обслуговування.

Таким чином, перехід до обробки на 5-осьовому фрезерному верстаті демонструє свою ефективність для підприємств, що прагнуть оптимізувати технологічний процес, зменшити витрати часу і підвищити точність

виготовлення деталей зі складною геометрією. Однак впровадження цього методу потребує значних початкових інвестицій і попередньої оцінки фінансових можливостей.

Таблиця 4.6 – Переваги та недоліки кожного методу.

Параметр	Метод 1 Протяжний + 4-х осьовий фрезерний з ЧПК	Метод 2 Фрезерний 5-ти осьовий верстат з ЧПК
Технологічна ефективність	Висока точність окремих операцій, але велика кількість установок збільшує похибки.	Зменшення кількості установок підвищує точність.
Час обробки	Тривалий час обробки в зв'язку з обробкою та переміщенням між двома верстатами.	Менший час обробки, зокрема завдяки меншій кількості установок.
Гнучкість	Обмежена, потрібні спеціалізовані протяжки.	Висока, можливість обробки деталей різної геометрії.
Енерговитрати	Вищі через використання двох верстатів.	Менші.
Вартість обладнання	Нижча початкова вартість.	Вища початкова вартість.
Вартість інструменту	Висока, через спеціалізовані протяжки.	Низька завдяки використанню стандартних фрез.

Кінець таблиці 4.6.

Завантаження виробничих площ	Висока завантаженість в зв'язку з габаритністю верстатів.	Порівняно низька завантаженість виробничих площ.
Обслуговування	Просте для протяжного, складніше для 4-осьового.	Високі вимоги до сервісного обслуговування.
Навчання операторів	Більш просте ніж для другого методу.	Високі вимоги до кваліфікації.

ВИСНОВОК

У магістерському дипломному проєкті було проведено дослідження методів обробки турбінної лопатки з метою підвищення ефективності виробничого процесу. Аналіз конструкції лопатки, її матеріалів, методів отримання заготовок, а також особливостей обробки на протяжних і фрезерних верстатах дозволив виявити недоліки традиційних підходів і запропонувати новий метод, що базується на використанні 5-осьового фрезерного верстата з ЧПК.

У ході роботи було виконано аналіз конструкції лопатки турбіни, що включав оцінку її геометрії, матеріалів з яких вона виготовляється та вимог до точності і якості поверхонь. Особливу увагу було приділено методам протягування для обробки хвостової частини типу «ластівчин хвіст» і фрезерування профілю лопатки. Виявлено, що використання двох різних верстатів збільшує кількість установок і перестановок заготовки, що підвищує ризик накопичення похибок і збільшує тривалість обробки.

Запропонований розроблений метод обробки на 5-осьовому фрезерному верстаті з ЧПК, який дозволяє об'єднати етапи обробки хвостової частини та профілю пера в одному технологічному циклі, що значно знижує кількість установок, скорочує час обробки та забезпечує високу точність. Аналітичний розрахунок режимів різання і маршруту обробки підтвердив ефективність цього підходу.

Аналіз економічних та організаційних показників показав, що хоча первинна вартість обладнання та навчання операторів для роботи з 5-осьовим верстатом є вищою, загальна продуктивність виробництва, скорочення витрат на інструменти та зменшення енерговитрат компенсують ці інвестиції у довгостроковій перспективі. Гнучкість 5-осьового верстата забезпечує можливість обробки широкого спектра деталей, що робить цей метод особливо привабливим для підприємств зі змінною номенклатурою

продукції. Або якщо підприємства хочуть швидко реагувати на зміну ринку в галузі металообробки.

Таким чином, результати проєкту доводять доцільність переходу на використання 5-осьового фрезерного верстата з ЧПК для обробки турбінних лопаток. Запропонований метод дозволяє значно підвищити продуктивність процесу, скоротити час обробки, зберегти точність та якість згідно технічних вимог і знизити витрати, що сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємства в сучасних умовах авіаційного виробництва.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Богуслаєв В.О. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик деталей ГТД. Лопатки компресора і вентилятора. Частина 1. Монографія. / В.О. Богуслаєв, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк, В.І. Колесников, В.К. Яценко, А.Я. Качан, Е.І. Цивирко, М.Р. Орлов, В.Є. Замковий, В.Ф. Мозговий, О.В. Рубель. – м. Запоріжжя.: вид. ОАО «Мотор Січ», 2003 р. – 396 с.
2. Терещенко Ю.М. Теорія теплових двигунів. К.: НАУ, 2009.
3. Мадорский Я.Ю. Теорія авіаційних двигунів : ч.1. , К.: 1969.
4. Boyce, Meherwan. "Gas Turbine Engineering Handbook 4th Edition". Publisher: Butterworth-Heinemann; (November 23, 2011). No. of pages — 1000.
5. Биба Є.Г., Левченко Г.Б., Полегенько О.О. Жароміцні інтерметалідні сплави та особливості їх легування. Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». 2024. Вип. 30. С. 58 – 67.
6. Matsugi K., Murata Y., Morinaga M., Yukawa N. Realistic Advancement for Nickel-based Single Crystal Superalloys by the d-electrons Concept. Superalloys : Int. Symposium. 1992. P. 307–316.
7. Евланов Н.Г., Зудин К.И., Карнов М.Я. и др. Определение оптимальных вариантов технологических процессов изготовления лопаток ГТД. – В сб.: Проблемы технологии изготовления лопаток компрессора. – НИАТ, 1982, с. 13-16.
8. Локтева С.Е. Станки с программным управлением и промышленные роботы. – М.: Машиностроение, 1986.
9. Чернов Н.Н. Металлорежущие станки. – М.: Машиностроение, 1988.
10. 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.

11. Методичні вказівки до виконання дипломного проекту для студентів спеціальності 7.0902 02 “Технологія машинобудування” / Уклад.: Ю.В. Петраков, В.Г.Біланенко, В.А.Пасічник. – К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2003. – 44 с.

12. Методичні вказівки до практичних занять з технології машинобудування (розділ – проектування технологічних процесів) для студентів спеціальностей / Укл. В.Д. Хорошков, О.В. Олексєєнко, Д.В. Павленко – Запоріжжя, ЗДТУ, 1999 р. – 78 с.

13. Проектирование технологии: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И.М. Баранчукова, А.А.Гусева, Ю.Б.Крамаренко и др.; Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.

14. Справочник технолога-машиностроителя. Под ред. А. Г. Косиловой. – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 2. – 446 с.

15. А. Д. Локтев, И. Ф. Гуцин, Г. П. Клименко и др., Общемашиностроительные нормативы режимов резания, т. 1, Москва: Машиностроение, 1991, с. 640.

16. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов и др. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.

17. Гайдук С. В., Кононов В. В., Федорченко Ю. М., Гайдук О. С. Високотемпературна корозія монокристалів нікелевих сплавів, що містять тантал. Вісник двигунобудування. 2007. № 1. С. 150–154. 18.

18. ДСТУ 3211:2009. Брухт і відходи кольорових металів і сплавів. Загальні технічні умови. Видання офіційне. Київ : Держспоживстандарт України, 2011. 76 с.

19. Металургія кольорових металів. Ч.7. Вторинна металургія кольорових металів : підручник / В. М. Бредихін та ін. ; за заг. ред. д.т.н., проф. І. Ф. Червоного. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 454 с.

20. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Часть 2. – М.: Машиностроение, 1974. – 473 с.

21. Інструмент сервіс, поставки промислового інструменту. URL: <https://instrumentservis.ua/c-rej/freza/conce vayacilindr.html> (дата звернення 02.12.24).

22. METALOREZ, інструментальне забезпечення. URL: <https://metalorez.com.ua/ua> (дата звернення 02.12.24).

23. РІАНО, інструменти та матеріали. URL: <https://www.rianto.com.ua> (дата звернення 02.12.24).

24. Haas F1 Team, official machine tool. URL: <https://www.haascnc.com/uk/shop/category/pricelist.html> (дата звернення 01.12.24).

25. Prom. URL: <https://prom.ua/ua/p1892757270-7b57-stanok-protyazhnoj.html> (дата звернення 01.12.24).

ДОДАТОК А

Фрагмент коду керуючої програми обробки лопатки турбіни на 5-ти осьовому фрезерному верстаті з ЧПК MC 673 – 51.

DEF REAL _Z_HOME, X_MAX, X_MIN, X_MIDDLE,	X172.891 Y23.106 Z-6.610
Y_MAX, U_CUR	X172.952 Y23.706 Z-6.572
_Z_HOME=\$MA_POS_LIMIT_PLUS[AX3]-1	X172.988 Y23.986 Z-6.570 B24.36793 A184.28471 F1768.2
Y_MAX=\$MA_POS_LIMIT_PLUS[AX2] - 1	X173.025 Y24.276 Z-6.582 B24.32901 A186.89934 F1708.4
X_MAX=\$MA_POS_LIMIT_PLUS[AX1] - 1	X173.042 Y24.424 Z-6.583 B24.30205 A188.24926 F3363.5
X_MIN=\$MA_POS_LIMIT_MINUS[AX1] + 1	X173.060 Y24.576 Z-6.580 B24.26960 A189.63028 F3264.0
U_CUR=\$AA_IM[U]	X173.068 Y24.653 Z-6.579 B24.25118 A190.33289 F6476.9
X_MIDDLE=(X_MIN+U_CUR)/2	X173.076 Y24.730 Z-6.575 B24.23121 A191.04413 F6463.5
	X173.092 Y24.886 Z-6.565 B24.18640 A192.49381 F3174.8
ROT	X173.121 Y25.206 Z-6.533 B24.07559 A195.50542 F1549.7
G40 G17 G94 G90 G60 G601 G710 FNORM SOFT	X173.147 Y25.537 Z-6.480 B23.93303 A198.67776 F1487.1
TRAFOOF	X173.158 Y25.705 Z-6.445 B23.84863 A200.32556 F2903.3
FXS[U]=0	X173.169 Y25.875 Z-6.407 B23.75584 A202.00143 F2856.6
FGROUP(X,Y,Z,A,B)	X173.188 Y26.216 Z-6.312 B23.54467 A205.43238 F1411.2
SUPA G1 G94 Z=_Z_HOME D0 F9999	X173.203 Y26.558 Z-6.195 B23.29944 A208.94074 F1382.4
SUPA B=0	X173.209 Y26.731 Z-6.127 B23.16094 A210.75702 F2696.1
SUPA A=0 X=X_MIDDLE Y=Y_MAX	X173.214 Y26.900 Z-6.054 B23.01474 A212.57318 F2703.2
T1	X173.221 Y27.240 Z-5.888 B22.69560 A216.27083 F1321.9
M6	X173.224 Y27.571 Z-5.697 B22.34610 A219.99734 F1308.2
D1	X173.223 Y27.895 Z-5.484 B21.96516 A223.76567 F1289.6
G642	X173.219 Y28.204 Z-5.248 B21.56100 A227.51365 F1285.7
G54	X173.212 Y28.497 Z-4.993 B21.13749 A231.22717 F1289.8
S2400 M3	X173.207 Y28.639 Z-4.855 B20.91445 A233.10937 F2522.4
G0 B24.38871 A181.76393	X173.201 Y28.774 Z-4.716 B20.69148 A234.94540 F2572.9
ORIWKS	X173.187 Y29.032 Z-4.422 B20.22888 A238.63353 F1277.6
R99=\$P_UIFR[1,A,FI]	X173.180 Y29.149 Z-4.272 B19.99785 A240.42123 F2628.2
STOPRE	X173.171 Y29.266 Z-4.114 B19.75675 A242.25405 F2536.1
TRAORI	X173.153 Y29.479 Z-3.795 B19.27802 A245.79768 F1304.1
G54	X173.132 Y29.666 Z-3.466 B18.78797 A249.30893 F1318.5
AROT X=R99	X173.120 Y29.755 Z-3.292 B18.53004 A251.11179 F2553.3
STOPRE	X173.108 Y29.834 Z-3.122 B18.27630 A252.84666 F2657.2
G1 X296.210 Y26.796 Z-279.831 B24.38871 A181.76393 M8	X173.082 Y29.979 Z-2.770 B17.74184 A256.40196 F1311.1
F10000.00	X173.069 Y30.039 Z-2.599 B17.47588 A258.11907 F2748.6
X174.348 Y18.523 Z-11.175	X173.054 Y30.097 Z-2.412 B17.19914 A259.87943 F2546.3
G93 G1 X174.109 Y18.586 Z-10.624 F828.1	X173.022 Y30.191 Z-2.051 B16.62957 A263.42087 F1336.0
X173.882 Y18.720 Z-10.081	X172.986 Y30.260 Z-1.694 B16.05410 A266.89578 F1370.1
X173.671 Y18.924 Z-9.553	X172.944 Y30.305 Z-1.329 B15.46840 A270.35733 F1351.0

X173.480 Y19.194 Z-9.049
 X173.310 Y19.527 Z-8.574
 X173.164 Y19.918 Z-8.138
 X173.045 Y20.360 Z-7.745
 X172.954 Y20.848 Z-7.401
 X172.892 Y21.375 Z-7.112
 X172.861 Y21.932 Z-6.882
 X172.861 Y22.512 Z-6.713
 X172.502 Y29.713 Z1.731 B10.65881 A299.55964 F2659.8
 X172.473 Y29.624 Z1.896 B10.40023 A301.29032 F2637.0
 X172.416 Y29.433 Z2.217 B9.89419 A304.76283 F1323.2
 X172.359 Y29.217 Z2.525 B9.40132 A308.27746 F1315.2
 X172.345 Y29.160 Z2.600 B9.27957 A309.17011 F5221.7
 X172.330 Y29.102 Z2.675 B9.15907 A310.06351 F5205.0
 X172.302 Y28.982 Z2.819 B8.92490 A311.82832 F2640.8
 X172.247 Y28.731 Z3.092 B8.48002 A315.31057 F1334.4
 X172.194 Y28.468 Z3.343 B8.06719 A318.72415 F1358.3
 X172.143 Y28.193 Z3.573 B7.68608 A322.07771 F1382.4
 X172.093 Y27.907 Z3.783 B7.33388 A325.40011 F1397.1
 X172.044 Y27.611 Z3.973 B7.00763 A328.71924 F1407.5
 X171.998 Y27.305 Z4.143 B6.70622 A332.04852 F1414.8
 X171.953 Y26.996 Z4.290 B6.43790 A335.28247 F1450.2
 X171.932 Y26.843 Z4.355 B6.31633 A336.85280 F2982.2
 X171.911 Y26.689 Z4.414 B6.20244 A338.39576 F3011.6
 X171.832 Y26.087 Z4.610 B5.81658 A344.31821 F782.9
 X171.789 Y25.807 Z4.717 B5.66272 A347.10989 F1651.0
 X171.743 Y25.540 Z4.841 B5.53119 A349.80304 F1677.3
 X171.526 Y24.590 Z5.127 B5.92882 A350.62607 F492.4
 X171.309 Y23.633 Z5.403 B6.30165 A351.52761 F490.7
 X171.090 Y22.666 Z5.667 B6.63823 A352.53679 F487.2
 X170.868 Y21.698 Z5.914 B6.94751 A353.48867 F488.8
 X170.644 Y20.732 Z6.145 B7.25230 A354.35409 F491.1
 X170.416 Y19.761 Z6.365 B7.58146 A354.99331 F489.6
 X169.974 Y17.887 Z6.768 B8.30299 A355.67953 F254.1
 X169.535 Y16.026 Z7.149 B9.01361 A356.43709 F256.4
 X169.308 Y15.043 Z7.338 B9.35791 A357.08847 F487.3
 X169.085 Y14.059 Z7.519 B9.71068 A357.83687 F487.8
 X168.862 Y13.079 Z7.688 B10.04722 A358.61580 F490.5
 X168.641 Y12.102 Z7.844 B10.37401 A359.38619 F493.4
 X168.420 Y11.126 Z7.987 B10.71244 A.12066 F494.7
 X168.199 Y10.143 Z8.120 B11.07016 A.77437 F491.8
 X167.982 Y9.176 Z8.243 B11.43525 A1.37065 F500.6
 X167.766 Y8.213 Z8.357 B11.80231 A1.98224 F503.6
 X167.549 Y7.236 Z8.460 B12.16581 A2.68235 F496.9
 X167.332 Y6.247 Z8.551 B12.51995 A3.54465 F491.5
 X167.110 Y5.231 Z8.627 B12.84810 A4.48027 F479.9
 X172.900 Y30.326 Z-.958 B14.86877 A273.86021 F1335.6
 X172.853 Y30.323 Z-.588 B14.27255 A277.32404 F1338.2
 X172.803 Y30.294 Z-.217 B13.68236 A280.77408 F1334.5
 X172.751 Y30.242 Z.151 B13.10593 A284.20152 F1331.0
 X172.698 Y30.166 Z.514 B12.54325 A287.61282 F1332.9
 X172.643 Y30.066 Z.872 B11.99053 A291.02013 F1331.2
 X172.587 Y29.942 Z1.222 B11.44893 A294.42870 F1331.1
 X172.530 Y29.794 Z1.564 B10.91864 A297.84919 F1328.8
 X165.176 Y-3.645 Z8.762 B15.38656 A11.82186 F493.7
 X164.958 Y-4.636 Z8.708 B15.55202 A12.70857 F492.0
 X164.737 Y-5.643 Z8.635 B15.71756 A13.62772 F484.1
 X164.518 Y-6.665 Z8.542 B15.92424 A14.62418 F476.4
 X164.306 Y-7.690 Z8.434 B16.20884 A15.60138 F475.3
 X164.104 Y-8.685 Z8.317 B16.51846 A16.50723 F488.8
 X163.904 Y-9.659 Z8.189 B16.79321 A17.40891 F498.9
 X163.701 Y-10.639 Z8.042 B16.99736 A18.47405 F494.5
 X163.491 Y-11.640 Z7.868 B17.10829 A19.83389 F481.6
 X163.278 Y-12.663 Z7.664 B17.15262 A21.51498 F469.7
 X163.063 Y-13.683 Z7.430 B17.14390 A23.33007 F468.1
 X162.842 Y-14.692 Z7.162 B17.07391 A25.09422 F468.6
 X162.609 Y-15.733 Z6.841 B16.99642 A26.81842 F448.7
 X162.496 Y-16.252 Z6.667 B17.02027 A27.65373 F895.0
 X162.391 Y-16.780 Z6.482 B17.13126 A28.55566 F878.3
 X162.292 Y-17.318 Z6.286 B17.30915 A29.58052 F861.1
 X162.203 Y-17.832 Z6.092 B17.50893 A30.67978 F897.3
 X162.121 Y-18.323 Z5.898 B17.69445 A31.84591 F935.6
 X162.034 Y-18.820 Z5.691 B17.84415 A33.07398 F918.3
 X161.949 Y-19.291 Z5.485 B17.93484 A34.35397 F958.7
 X161.857 Y-19.764 Z5.263 B17.95724 A35.68970 F942.1
 X161.757 Y-20.240 Z5.024 B17.91297 A37.09158 F923.2
 X161.651 Y-20.718 Z4.766 B17.81427 A38.55597 F903.3
 X161.540 Y-21.193 Z4.492 B17.67352 A40.09053 F893.4
 X161.422 Y-21.683 Z4.189 B17.49626 A41.71867 F849.8
 X161.301 Y-22.162 Z3.870 B17.30871 A43.30853 F851.4
 X161.178 Y-22.640 Z3.527 B17.13926 A44.92127 F831.1
 X161.059 Y-23.108 Z3.164 B17.03487 A46.53666 F827.9
 X161.007 Y-23.352 Z2.971 B17.00753 A47.99123 F1584.3
 X160.941 Y-23.683 Z2.676 B16.98354 A49.56016 F1115.8
 X160.912 Y-23.895 Z2.495 B16.96409 A52.04997 F1785.1
 X160.884 Y-24.099 Z2.305 B16.92110 A54.52772 F1786.5
 X160.857 Y-24.295 Z2.107 B16.87228 A56.99709 F1784.7
 X160.831 Y-24.484 Z1.901 B16.82102 A59.46129 F1780.3
 X160.806 Y-24.665 Z1.686 B16.76818 A61.92247 F1773.4
 X160.782 Y-24.838 Z1.463 B16.71459 A64.38259 F1766.2
 X160.760 Y-25.003 Z1.233 B16.66206 A66.82654 F1760.8
 X160.738 Y-25.158 Z.997 B16.61305 A69.22854 F1764.1

X166.887 Y4.216 Z8.684 B13.14756 A5.33716 F480.3
 X166.659 Y3.204 Z8.728 B13.43327 A6.09418 F481.3
 X166.429 Y2.213 Z8.766 B13.72020 A6.72998 F491.2
 X166.224 Y1.307 Z8.793 B14.02341 A7.22298 F538.0
 X166.015 Y.333 Z8.811 B14.35744 A7.80334 F502.0
 X165.811 Y-.662 Z8.821 B14.69852 A8.76548 F492.3
 X165.604 Y-1.668 Z8.821 B14.97281 A10.00379 F486.8
 X165.393 Y-2.657 Z8.801 B15.19629 A10.96854 F494.6
 X160.583 Y-26.074 Z-1.363 B16.18936 A89.58700 F1773.3
 X160.569 Y-26.113 Z-1.642 B16.12882 A91.72785 F1774.4
 X160.556 Y-26.140 Z-1.922 B16.06379 A93.85789 F1773.9
 X160.545 Y-26.154 Z-2.203 B15.99406 A95.97944 F1773.2
 X160.523 Y-26.143 Z-2.767 B15.83914 A100.21658 F886.2
 X160.504 Y-26.081 Z-3.331 B15.66098 A104.48280 F881.0
 X160.487 Y-25.966 Z-3.891 B15.45836 A108.80739 F874.8
 X160.474 Y-25.800 Z-4.440 B15.23423 A113.18961 F870.0
 X160.465 Y-25.581 Z-4.978 B14.98853 A117.67252 F861.6
 X160.459 Y-25.309 Z-5.497 B14.72325 A122.28851 F852.7
 X160.457 Y-24.987 Z-5.994 B14.44546 A127.02805 F844.6
 X160.460 Y-24.616 Z-6.464 B14.15777 A131.93482 F834.4
 X160.468 Y-24.195 Z-6.903 B13.86537 A137.03959 F822.6
 X160.482 Y-23.732 Z-7.300 B13.58681 A142.24810 F819.0
 X160.503 Y-23.230 Z-7.651 B13.33718 A147.52301 F816.5
 X160.532 Y-22.693 Z-7.954 B13.12306 A152.86556 F810.3
 X160.568 Y-22.133 Z-8.201 B12.95416 A158.18741 F814.7
 X160.614 Y-21.558 Z-8.392 B12.83385 A163.47848 F823.0
 X160.668 Y-20.973 Z-8.530 B12.77128 A168.80065 F829.0
 X160.716 Y-20.770 Z-8.574 B12.86332 A170.13662 F2348.1
 X160.767 Y-20.537 Z-8.617 B12.94907 A171.56309 F2063.7
 X160.874 Y-20.008 Z-8.692 B13.05358 A174.57551 F916.1
 X160.980 Y-19.458 Z-8.745 B13.05427 A177.24714 F889.8
 X161.085 Y-18.932 Z-8.774 B12.96858 A179.30644 F930.1
 X161.316 Y-17.941 Z-8.790 B12.80210 A181.70566 F491.6
 X161.572 Y-16.941 Z-8.774 B12.74184 A183.16357 F484.0
 X162.071 Y-15.054 Z-8.697 B12.77485 A185.09379 F256.0
 X162.576 Y-13.159 Z-8.562 B12.97907 A186.43170 F254.4
 X163.087 Y-11.354 Z-8.397 B13.31901 A186.83062 F265.6
 X163.610 Y-9.584 Z-8.235 B13.81215 A186.71550 F269.8
 X163.872 Y-8.704 Z-8.152 B14.08944 A186.66909 F542.7
 X164.148 Y-7.770 Z-8.064 B14.35055 A186.55739 F511.3
 X164.623 Y-6.159 Z-7.922 B14.74958 A185.91544 F296.6
 X165.122 Y-4.467 Z-7.798 B15.12251 A184.82308 F282.7
 X165.631 Y-2.725 Z-7.699 B15.59485 A184.09594 F275.2
 X166.138 Y-.959 Z-7.610 B16.16809 A183.56968 F271.8
 X166.383 Y-.112 Z-7.568 B16.45471 A183.25403 F566.3
 X166.625 Y.736 Z-7.532 B16.72998 A183.04043 F566.2
 X166.866 Y1.617 Z-7.501 B16.98534 A183.03231 F547.6
 X167.107 Y2.530 Z-7.464 B17.22703 A183.09172 F528.7
 X167.350 Y3.430 Z-7.422 B17.47390 A183.04408 F536.0
 X167.591 Y4.302 Z-7.380 B17.73628 A182.93859 F551.8
 X168.083 Y6.058 Z-7.309 B18.34881 A182.75242 F274.0
 X168.589 Y7.844 Z-7.235 B19.07748 A182.56878 F269.1
 X169.080 Y9.583 Z-7.163 B19.76525 A182.51626 F276.6
 X169.549 Y11.347 Z-7.081 B20.29014 A182.77549 F273.6
 X160.717 Y-25.304 Z.755 B16.56809 A71.59116 F1765.0
 X160.698 Y-25.441 Z.508 B16.52744 A73.91853 F1763.0
 X160.679 Y-25.568 Z.255 B16.48759 A76.22256 F1760.5
 X160.661 Y-25.684 Z-.005 B16.44434 A78.51753 F1754.8
 X160.644 Y-25.788 Z-.271 B16.39779 A80.79837 F1750.7
 X160.627 Y-25.879 Z-.540 B16.34948 A83.04186 F1757.4
 X160.611 Y-25.957 Z-.812 B16.29906 A85.25035 F1763.6
 X160.597 Y-26.022 Z-1.086 B16.24590 A87.42997 F1770.4
 X170.043 Y13.096 Z-6.998 B20.84049 A182.10041 F274.9
 X170.535 Y14.831 Z-6.932 B21.43862 A181.68264 F277.1
 X171.016 Y16.624 Z-6.862 B21.99583 A181.87660 F269.1
 X171.256 Y17.515 Z-6.819 B22.24785 A181.85953 F541.1
 X171.492 Y18.379 Z-6.778 B22.49697 A181.70140 F557.8
 X171.728 Y19.220 Z-6.744 B22.75415 A181.35298 F572.1
 X171.974 Y20.108 Z-6.716 B23.03597 A181.08443 F542.1
 X172.471 Y21.950 Z-6.651 B23.68165 A181.32390 F262.0
 X172.952 Y23.705 Z-6.572 B24.38871 A181.76354 F274.6
 G94 X173.125 Y24.283 Z-6.579 F500.0
 X173.324 Y24.848 Z-6.654
 X173.546 Y25.392 Z-6.794
 X173.788 Y25.907 Z-6.998
 X174.045 Y26.384 Z-7.262
 X174.316 Y26.818 Z-7.584
 X174.595 Y27.201 Z-7.958
 X174.878 Y27.529 Z-8.378
 X175.161 Y27.796 Z-8.839
 X175.441 Y27.999 Z-9.335
 X175.713 Y28.134 Z-9.856
 X175.973 Y28.201 Z-10.397
 X176.217 Y28.196 Z-10.950
 G0 X184.475 Y28.757 Z-29.156
 X182.529 Y19.071 Z-29.082 A181.76393
 X174.270 Y18.510 Z-10.875
 G93 G1 X174.031 Y18.575 Z-10.324 F828.1
 X173.806 Y18.711 Z-9.781
 X173.596 Y18.916 Z-9.253
 X173.407 Y19.188 Z-8.749
 X173.239 Y19.523 Z-8.275

X173.096 Y19.914 Z-7.838
 X172.979 Y20.358 Z-7.445
 X172.891 Y20.847 Z-7.102
 X172.833 Y21.374 Z-6.813
 X172.805 Y21.931 Z-6.583
 X172.808 Y22.511 Z-6.416
 X172.842 Y23.105 Z-6.312
 X172.907 Y23.704 Z-6.275
 X172.942 Y23.973 Z-6.273 B24.36793 A184.28471 F1848.2
 X172.980 Y24.250 Z-6.286 B24.32901 A186.89934 F1786.5
 X173.015 Y24.536 Z-6.287 B24.26960 A189.63028 F1732.2
 X173.047 Y24.832 Z-6.273 B24.18640 A192.49381 F1679.0
 X173.077 Y25.137 Z-6.244 B24.07559 A195.50542 F1624.4
 X173.104 Y25.452 Z-6.195 B23.93303 A198.67776 F1560.8
 X173.116 Y25.613 Z-6.163 B23.84863 A200.32556 F3046.5
 X173.127 Y25.775 Z-6.127 B23.75584 A202.00143 F2999.3
 X173.146 Y26.100 Z-6.039 B23.54467 A205.43238 F1481.8
 X173.163 Y26.426 Z-5.928 B23.29944 A208.94074 F1452.1
 X173.169 Y26.591 Z-5.865 B23.16094 A210.75702 F2832.6
 X173.175 Y26.752 Z-5.795 B23.01474 A212.57318 F2840.8
 X173.184 Y27.077 Z-5.639 B22.69560 A216.27083 F1389.0
 X173.188 Y27.393 Z-5.459 B22.34610 A219.99734 F1374.6
 X173.189 Y27.546 Z-5.362 B22.16200 A221.85174 F2757.8
 X173.190 Y27.701 Z-5.257 B21.96516 A223.76567 F2664.2
 X173.187 Y27.997 Z-5.034 B21.56100 A227.51365 F1350.5
 X173.182 Y28.276 Z-4.792 B21.13749 A231.22717 F1354.5
 X173.178 Y28.412 Z-4.661 B20.91445 A233.10937 F2648.3
 X173.173 Y28.541 Z-4.529 B20.69148 A234.94540 F2701.0
 X173.162 Y28.787 Z-4.249 B20.22888 A238.63353 F1340.9
 X173.155 Y28.901 Z-4.108 B19.99785 A240.42123 F2755.9
 X173.148 Y29.012 Z-3.957 B19.75675 A242.25405 F2660.9
 X173.132 Y29.215 Z-3.653 B19.27802 A245.79768 F1367.5
 X173.113 Y29.395 Z-3.340 B18.78797 A249.30893 F1382.0
 X173.103 Y29.480 Z-3.173 B18.53004 A251.11179 F2675.9
 X173.092 Y29.556 Z-3.011 B18.27630 A252.84666 F2784.3
 X173.068 Y29.694 Z-2.675 B17.74184 A256.40196 F1373.5
 X173.056 Y29.752 Z-2.512 B17.47588 A258.11907 F2878.9
 X173.042 Y29.808 Z-2.333 B17.19914 A259.87943 F2666.6
 X173.012 Y29.898 Z-1.989 B16.62957 A263.42087 F1398.9
 X172.979 Y29.963 Z-1.648 B16.05410 A266.89578 F1434.4
 X172.960 Y29.986 Z-1.478 B15.77238 A268.55887 F2903.1
 X172.940 Y30.005 Z-1.299 B15.46840 A270.35733 F2757.3
 X172.898 Y30.026 Z-.945 B14.86877 A273.86021 F1398.5
 X172.853 Y30.022 Z-.591 B14.27255 A277.32404 F1401.2
 X172.805 Y29.995 Z-.237 B13.68236 A280.77408 F1397.4
 X172.756 Y29.944 Z.114 B13.10593 A284.20152 F1393.8
 X172.705 Y29.870 Z.461 B12.54325 A287.61282 F1396.3
 X172.653 Y29.773 Z.802 B11.99053 A291.02013 F1394.9
 X172.599 Y29.654 Z1.136 B11.44893 A294.42870 F1395.0
 X172.572 Y29.586 Z1.300 B11.18225 A296.13760 F2785.1
 X172.545 Y29.512 Z1.461 B10.91864 A297.84919 F2786.8
 X172.490 Y29.348 Z1.777 B10.40023 A301.29032 F1388.7
 X172.436 Y29.164 Z2.081 B9.89419 A304.76283 F1388.3
 X172.381 Y28.957 Z2.374 B9.40132 A308.27746 F1380.8
 X172.326 Y28.731 Z2.652 B8.92490 A311.82832 F1377.6
 X172.273 Y28.491 Z2.911 B8.48002 A315.31057 F1401.4
 X172.222 Y28.238 Z3.149 B8.06719 A318.72415 F1426.4
 X172.173 Y27.976 Z3.366 B7.68608 A322.07771 F1451.7
 X172.124 Y27.702 Z3.563 B7.33388 A325.40011 F1467.2
 X172.101 Y27.561 Z3.655 B7.16721 A327.06417 F2942.1
 X172.078 Y27.419 Z3.742 B7.00763 A328.71924 F2972.3
 X172.033 Y27.126 Z3.901 B6.70622 A332.04852 F1487.0
 X171.990 Y26.831 Z4.039 B6.43790 A335.28247 F1523.9
 X171.949 Y26.539 Z4.155 B6.20244 A338.39576 F1574.5
 X171.910 Y26.247 Z4.250 B5.99582 A341.41122 F1616.1
 X171.900 Y26.174 Z4.271 B5.94846 A342.14935 F6567.7
 X171.890 Y26.103 Z4.292 B5.90283 A342.87999 F6627.9
 X171.871 Y25.964 Z4.337 B5.81658 A344.31821 F3389.7
 X171.828 Y25.697 Z4.440 B5.66272 A347.10989 F1733.0
 X171.783 Y25.443 Z4.559 B5.53119 A349.80304 F1757.3
 X171.564 Y24.497 Z4.844 B5.92882 A350.62607 F494.2
 X171.345 Y23.545 Z5.118 B6.30165 A351.52761 F492.7
 X171.124 Y22.583 Z5.380 B6.63823 A352.53679 F489.5
 X170.900 Y21.620 Z5.626 B6.94751 A353.48867 F490.9
 X170.675 Y20.658 Z5.856 B7.25230 A354.35409 F493.0
 X170.446 Y19.690 Z6.074 B7.58146 A354.99331 F491.0
 X170.000 Y17.820 Z6.477 B8.30299 A355.67953 F254.5
 X169.557 Y15.962 Z6.856 B9.01361 A356.43709 F256.8
 X169.328 Y14.983 Z7.045 B9.35791 A357.08847 F488.7
 X169.103 Y14.003 Z7.225 B9.71068 A357.83687 F489.4
 X168.879 Y13.026 Z7.393 B10.04722 A358.61580 F492.3
 X168.656 Y12.054 Z7.548 B10.37401 A359.38619 F495.1
 X168.434 Y11.082 Z7.690 B10.71244 A.12066 F496.3
 X168.210 Y10.102 Z7.823 B11.07016 A.77437 F493.2
 X167.991 Y9.138 Z7.946 B11.43525 A1.37065 F501.9
 X167.773 Y8.178 Z8.059 B11.80231 A1.98224 F504.9
 X167.554 Y7.205 Z8.162 B12.16581 A2.68235 F498.7
 X167.336 Y6.220 Z8.252 B12.51995 A3.54465 F493.6
 X167.113 Y5.210 Z8.328 B12.84810 A4.48027 F482.3
 X166.888 Y4.201 Z8.384 B13.14756 A5.33716 F483.0
 X163.472 Y-11.582 Z7.574 B17.10829 A19.83389 F484.8
 X163.258 Y-12.596 Z7.372 B17.15262 A21.51498 F473.5

X163.043 Y-13.607 Z7.140 B17.14390 A23.33007 F472.2
 X162.823 Y-14.607 Z6.874 B17.07391 A25.09422 F472.6
 X162.590 Y-15.640 Z6.557 B16.99642 A26.81842 F452.3
 X162.371 Y-16.678 Z6.200 B17.13126 A28.55566 F446.7
 X162.271 Y-17.210 Z6.007 B17.30915 A29.58052 F868.7
 X162.182 Y-17.720 Z5.814 B17.50893 A30.67978 F906.3
 X162.098 Y-18.205 Z5.623 B17.69445 A31.84591 F946.1
 X162.011 Y-18.695 Z5.419 B17.84415 A33.07398 F929.2
 X161.926 Y-19.161 Z5.215 B17.93484 A34.35397 F970.9
 X161.833 Y-19.627 Z4.996 B17.95724 A35.68970 F954.9
 X161.734 Y-20.096 Z4.761 B17.91297 A37.09158 F936.1
 X161.628 Y-20.568 Z4.507 B17.81427 A38.55597 F916.4
 X161.519 Y-21.036 Z4.238 B17.67352 A40.09053 F906.8
 X161.401 Y-21.518 Z3.939 B17.49626 A41.71867 F862.9
 X161.281 Y-21.989 Z3.625 B17.30871 A43.30853 F864.5
 X161.160 Y-22.461 Z3.287 B17.13926 A44.92127 F843.5
 X161.041 Y-22.922 Z2.929 B17.03487 A46.53666 F839.2
 X160.989 Y-23.162 Z2.739 B17.00753 A47.99123 F1611.0
 X160.924 Y-23.483 Z2.451 B16.98354 A49.56016 F1146.6
 X160.896 Y-23.685 Z2.280 B16.96409 A52.04997 F1876.8
 X160.868 Y-23.879 Z2.100 B16.92110 A54.52772 F1877.4
 X160.842 Y-24.067 Z1.912 B16.87228 A56.99709 F1874.7
 X160.816 Y-24.247 Z1.716 B16.82102 A59.46129 F1869.3
 X160.792 Y-24.420 Z1.512 B16.76818 A61.92247 F1861.5
 X160.769 Y-24.586 Z1.300 B16.71459 A64.38259 F1853.3
 X160.746 Y-24.744 Z1.082 B16.66206 A66.82654 F1846.8
 X160.725 Y-24.893 Z.857 B16.61305 A69.22854 F1849.1
 X160.705 Y-25.033 Z.627 B16.56809 A71.59116 F1849.0
 X160.686 Y-25.165 Z.391 B16.52744 A73.91853 F1845.9
 X160.668 Y-25.287 Z.150 B16.48759 A76.22256 F1842.5
 X160.650 Y-25.399 Z-.098 B16.44434 A78.51753 F1836.0
 X160.633 Y-25.499 Z-.352 B16.39779 A80.79837 F1831.2
 X160.617 Y-25.587 Z-.609 B16.34948 A83.04186 F1837.1
 X160.602 Y-25.662 Z-.869 B16.29906 A85.25035 F1842.7
 X160.588 Y-25.725 Z-1.132 B16.24590 A87.42997 F1849.2
 X160.574 Y-25.776 Z-1.397 B16.18936 A89.58700 F1851.6
 X160.562 Y-25.814 Z-1.664 B16.12882 A91.72785 F1852.3
 X160.549 Y-25.840 Z-1.932 B16.06379 A93.85789 F1851.4
 X160.538 Y-25.854 Z-2.202 B15.99406 A95.97944 F1850.5
 X160.518 Y-25.844 Z-2.742 B15.83914 A100.21658 F924.7
 X160.500 Y-25.785 Z-3.282 B15.66098 A104.48280 F919.4
 X160.485 Y-25.675 Z-3.818 B15.45836 A108.80739 F913.2
 X160.474 Y-25.515 Z-4.345 B15.23423 A113.18961 F908.6
 X160.466 Y-25.305 Z-4.859 B14.98853 A117.67252 F900.3
 X160.461 Y-25.045 Z-5.356 B14.72325 A122.28851 F891.7
 X160.462 Y-24.736 Z-5.830 B14.44546 A127.02805 F883.9
 X160.466 Y-24.381 Z-6.278 B14.15777 A131.93482 F874.1
 X160.476 Y-23.978 Z-6.695 B13.86537 A137.03959 F862.7
 X160.492 Y-23.536 Z-7.072 B13.58681 A142.24810 F859.6
 X160.515 Y-23.058 Z-7.406 B13.33718 A147.52301 F857.5
 X160.545 Y-22.547 Z-7.692 B13.12306 A152.86556 F851.8
 X160.583 Y-22.013 Z-7.926 B12.95416 A158.18741 F856.6
 X160.629 Y-21.466 Z-8.107 B12.83385 A163.47848 F865.3
 X160.684 Y-20.910 Z-8.238 B12.77128 A168.80065 F871.5
 X160.731 Y-20.714 Z-8.280 B12.86332 A170.13662 F2422.2
 X160.782 Y-20.488 Z-8.321 B12.94907 A171.56309 F2127.8
 X160.888 Y-19.974 Z-8.394 B13.05358 A174.57551 F943.0
 X160.994 Y-19.439 Z-8.446 B13.05427 A177.24714 F912.3
 X161.100 Y-18.923 Z-8.474 B12.96858 A179.30644 F948.7
 X161.332 Y-17.945 Z-8.490 B12.80210 A181.70566 F497.3
 X161.588 Y-16.951 Z-8.474 B12.74184 A183.16357 F487.3
 X162.087 Y-15.074 Z-8.398 B12.77485 A185.09379 F257.2
 X162.590 Y-13.188 Z-8.264 B12.97907 A186.43170 F255.5
 X163.100 Y-11.386 Z-8.098 B13.31901 A186.83062 F265.9
 X163.620 Y-9.615 Z-7.936 B13.81215 A186.71550 F269.8
 X163.880 Y-8.735 Z-7.854 B14.08944 A186.66909 F542.8
 X164.156 Y-7.800 Z-7.765 B14.35055 A186.55739 F511.1
 X164.628 Y-6.185 Z-7.623 B14.74958 A185.91544 F296.1
 X165.126 Y-4.487 Z-7.498 B15.12251 A184.82308 F281.8
 X165.632 Y-2.741 Z-7.400 B15.59485 A184.09594 F274.7
 X166.135 Y-.974 Z-7.310 B16.16809 A183.56968 F271.8
 X166.379 Y-.124 Z-7.268 B16.45471 A183.25403 F565.0
 X166.620 Y.726 Z-7.233 B16.72998 A183.04043 F565.1
 X166.859 Y1.607 Z-7.201 B16.98534 A183.03231 F547.7
 X167.099 Y2.519 Z-7.164 B17.22703 A183.09172 F529.8
 X167.340 Y3.418 Z-7.122 B17.47390 A183.04408 F536.7
 X167.580 Y4.292 Z-7.081 B17.73628 A182.93859 F551.3
 X168.069 Y6.050 Z-7.009 B18.34881 A182.75242 F273.8
 X168.572 Y7.836 Z-6.936 B19.07748 A182.56878 F269.2
 X169.059 Y9.576 Z-6.864 B19.76525 A182.51626 F276.6
 X169.525 Y11.338 Z-6.782 B20.29014 A182.77549 F274.0
 X170.017 Y13.091 Z-6.699 B20.84049 A182.10041 F274.3
 X170.505 Y14.829 Z-6.633 B21.43862 A181.68264 F276.9
 X170.983 Y16.619 Z-6.563 B21.99583 A181.87660 F269.6
 X171.221 Y17.510 Z-6.521 B22.24785 A181.85953 F541.6
 X171.456 Y18.376 Z-6.480 B22.49697 A181.70140 F557.0
 X171.691 Y19.219 Z-6.446 B22.75415 A181.35298 F570.4
 X171.936 Y20.109 Z-6.418 B23.03597 A181.08443 F541.6
 X172.430 Y21.949 Z-6.353 B23.68165 A181.32390 F262.3
 X172.906 Y23.704 Z-6.275 B24.38871 A181.76354 F274.7...