

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Сахнюк Наталія Василівна

УДК 621.7.015

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ
ЛОПАТОК КОМПРЕСОРІВ В ДОСЛІДНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2008

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одними з основних і відповідальних деталей газотурбінних двигунів (ГТД) є робочі лопатки компресора, які багато в чому визначають його ресурс і надійність. Вони працюють в умовах підвищеного напружено-деформованого стану, викликаного як відцентровими, так і вібраційними навантаженнями, а також впливами радіальної й окружної нерівномірностей повітряного потоку. Крім того, лопатки піддаються корозії й ерозії в результаті взаємодії з повітряним потоком. У ГТД широко використовують лопатки, що виготовляють з титанових сплавів, внаслідок їх високої питомої міцності і антикорозійної стійкості.

Разом з тим, зростання вимог до надійності, збільшення ресурсу й жорсткості експлуатаційних режимів ГТД постійно приводять, з одного боку, до створення нових конструкцій компресорів з більш високим рівнем характеристик, а з іншого – висуваються вимоги до підвищення ефективності їх виробництва. Часта зміна конструкції робочих лопаток у процесі відпрацювання в дослідному виробництві раціональної конструкції компресорів авіаційних двигунів викликають необхідність розроблення гнучкої технології, яка повинна забезпечувати високі параметри їх якості.

У той же час, з огляду на підвищену чутливість до концентрації напружень титанових сплавів, виготовлення лопаток з цих сплавів сполученням сучасного методу високошвидкісного фрезерування (ВШФ) з подальшою оздоблювально-змцнювальною обробкою не можливо здійснити без досліджень впливу технологічних факторів на якісні характеристики поверхневого шару й працездатність лопаток, що є актуальною задачею і має велике науково-технічне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язано з госпдоговірною науковою темою: „Визначення оптимальної технології виготовлення титанових лопаток компресора, отриманих методом високошвидкісного фрезерування” кафедри „Технологія авіаційних двигунів і машинобудування” Запорізького національного технічного університету (ГД № 4023 від 03.03.2003 р.) та ДП ЗМКБ „Івченко-Прогрес”, а також держбюджетною науковою темою „Розробка технологічних основ забезпечення якості обробки нежорстких деталей при високошвидкісному різанні” кафедри „Металорізальні верстати і інструменти” Запорізького національного технічного університету (ДР № 0106U000366, 2006-2008 рр.).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є технологічне забезпечення параметрів якості поверхневого шару та працездатності при виготовленні робочих лопаток компресорів в умовах дослідного виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- встановити закономірності зміни параметрів якості поверхневого шару складнопрофільних деталей залежно від характеру й послідовності технологічних операцій їх виготовлення;
- визначити розрахункові залежності кутів поворотних осей і координат розрахункової точки інструмента для формування траєкторії руху при формоутворенні лопаток методом ВШФ та намітити основні етапи технології їх виготовлення;
- обґрунтувати стратегії, а також вибрати й експериментально підтвердити раціональні технологічні параметри обробки поверхонь лопаток компресора ВШФ;

- зробити порівняльний аналіз варіантів оздоблювально-зміцнювальної обробки титанових лопаток компресора, отриманих методом ВШФ. Виконати експериментальні дослідження характеристик якості їх поверхневого шару, як після ВШФ, так і в сполученні з оздоблювально-зміцнювальною обробкою, визначивши границю витривалості. Отримати залежність, що враховує вплив параметрів якості поверхневого шару лопаток на границю витривалості;
- розробити структуру побудови і технологічні рекомендації зі складання технологічних процесів виготовлення лопаток компресорів у дослідному виробництві.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення лопаток компресорів.

Предмет дослідження – параметри якості поверхневого шару та працездатності лопаток.

Методи дослідження: методи інженерної механіки – для дослідження фізико-механічних характеристик якості та працездатності; методи математичної статистики – для обробки результатів випробувань.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше, на основі комплексних досліджень параметрів якості поверхневого шару складнопрофільних деталей з титанових сплавів, отримані закономірності зміни цих параметрів залежно від характеру й послідовності технологічних операцій їх виготовлення, що дозволило розробити гнучку технологію, результатом якої є скорочення циклу підготовки виробництва, зменшення собівартості виготовлення та підвищення працездатності.
2. Визначені залежності для знаходження кутів поворотних осей і координат розрахункової точки фрези при п'ятикоординатній високошвидкісній обробці складнопрофільних поверхонь лопаток, що забезпечують необхідну точність їх геометричних параметрів.
3. Обґрунтована та експериментально підтверджена можливість технологічного забезпечення якості лопаток компресорів сполученням високошвидкісного фрезерування з наступним поліруванням і ультразвуковим зміцненням, що дозволило розробити раціональну структуру технологічного процесу їх виготовлення.
4. Отримана емпірична залежність впливу параметрів якості поверхневого шару на границю витривалості лопаток, отриманих високошвидкісним фрезеруванням з наступною оздоблювально-зміцнювальною обробкою, що дозволяє прогнозувати ресурс їх роботи.
5. Встановлено вплив технологічної спадковості попередніх операцій на напружено-деформований стан робочих поверхонь лопаток компресорів, на підставі якого виконується вибір раціональних режимів оздоблювально-зміцнювальної обробки.

Практичне значення одержаних результатів. Практичну цінність роботи представляють: розроблена в процесі досліджень структура побудови технологічних процесів та технологічні рекомендації зі складання технологічних процесів виготовлення лопаток різних ступеней компресорів для ряду типів двигунів в умовах дослідного виробництва, оснований на раціональному сполученні ВШФ і оздоблювально-зміцнювальної обробки. Технологічні рекомендації забезпечують отримання високого рівня границі витривалості з урахуванням геометричних особливостей лопаток, в умовах дослідного виробництва ДП ЗМКБ "Івченко-Прогрес". Впровадження технології виготовлення лопаток компресорів, рекомендацій зі створення сприятливого сполучення властивостей поверхневого шару збільшило їх опір втоми на 25,5% та суттєво зменшило розсіювання довготривалості. Річ-

ний економічний ефект від впровадження технологічних рекомендацій зі складання технологічних процесів виготовлення лопаток становить 183205 грн.

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри “Технологія авіаційних двигунів” ЗНТУ при викладанні дисципліни “Прогресивні технологічні процеси авіадвигунобудування”.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, які виносяться на захист, розроблено самостійно. Автором отримані та проаналізовані результати експериментальних досліджень, сформульовані ідеї основних наукових результатів. Формулювання задач, теоретичних положень і висновків проводилося разом з науковим керівником. Проведення окремих виробничих випробувань, розроблення програмних продуктів та впровадження результатів роботи виконано спільно з співробітниками ДП ЗМКБ “Івченко-Прогрес” та ВАТ “Мотор Січ”. Роботи з підготовки окремих статей виконано за участю співавторів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації доповідалися на наукових семінарах кафедри „Технологія авіаційних двигунів” Запорізького національного технічного університету (2004-2007), а також: на міжнародних науково-технічних конференціях „Нові технології, методи обробки та зміцнення деталей енергетичних установок” (м. Запоріжжя-Алушта, 2004, 2006), „Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку.” (м. Краматорськ, 2004, 2005); VIII міжнародній молодіжній науково-практичній конференції „ЛЮДИНА І КОСМОС” (м. Дніпропетровськ, 2006), міжнародній молодіжній науково-технічній конференції „Молодь в авіації: нові рішення та перспективні технології” (м. Запоріжжя-Алушта, 2007).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на XVI міжнародному науково-технічному семінарі "Високі технології в машинобудуванні" ІНТЕРПАРТНЕР-2007 (м. Запоріжжя-Харків-Алушта, 2007); на розширеному засіданні кафедри "Технологія авіаційних двигунів" Запорізького національного технічного університету (м. Запоріжжя, 2008); на розширеному засіданні наукового семінару кафедри "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" (м. Харків, 2008).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 10 наукових праць, з них 6 статей в наукових фахових виданнях України.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 167 сторінок, з них 55 ілюстрацій по тексту, 4 ілюстрації на 2 сторінках, 22 таблиці по тексту, 6 таблиць на 4 сторінках, 5 додатків на 11 сторінках, 149 використаних літературних джерел на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми та важливість питань, які розглянуті в дисертації, сформульована мета, задачі, наукова новизна, практичне значення та основні наукові положення, які автор виносить на захист.

У **першому розділі** проведений аналіз літературних джерел зі станом питання технологічного забезпечення параметрів якості робочих лопаток компресорів ГТД.

Ресурс лопаток компресорів визначається головним чином величиною та характером змінних напружень і опором втоми їх матеріалу.

Встановлено, що до 70% відмов втомного походження й більшість з них (90...92%) пов'язане зі станом поверхневого шару.

Опір втоми лопаток залежить від матеріалу, конструкції і технології їх виготовлення, але в кожному разі на величину границі витривалості значно впливає стан поверхневого шару, однорідність і стабільність характеристик якого, сприяє зниженню розсіювання його витривалості. На оздоблювальних операціях обробки лопаток повинне бути забезпечене зняття мікронерівностей, ризок і інших невідповідностей попередніх обробок, а також створені залишкові стискаючі напруження в поверхневому шарі.

Оскільки лопатки компресорів з титанових сплавів дуже чутливі до концентраторів напружень і при експлуатації зазнають високих експлуатаційних навантажень, то технологія виробництва лопаток може значно вплинути на їх працездатність.

Форму й розміри виготовлених лопаток, забезпечують різними технологічними методами, серед яких найбільш перспективним є високошвидкісне фрезерування, а остаточний стан поверхневого шару формується оздоблювально-зміцнювальною обробкою. З аналізу відомих літературних джерел випливає, що широке поширення при виготовленні лопаток ГТД одержали різні методи поверхневого пластичного деформування. Тому особливе значення має вибір раціонального методу оздоблювально-зміцнювальної обробки титанових лопаток компресорів, які мають легкоушкоджувані тонкі кромки, після їх виготовлення ВШФ, що спричиняє такі обмеження і вимоги:

- недопустимість зміни геометрії лопатки;
- рівномірність зміцнення по довжині пера лопатки, що виключає перенаклеп кромок;
- повна нейтралізація несприятливого впливу технологічних концентраторів напружень;
- неприпустиме погіршення шорсткості поверхні;
- висока продуктивність як в дослідному, так і в серійному виробництвах.

Найбільш раціональними методами оздоблювально-зміцнювальної обробки пера робочих лопаток компресорів є полірування та ультразвукове зміцнення кульками. Полірування широко застосовується в авіаційній галузі, однак за допомогою цього процесу не можна отримати необхідне сполучення характеристик якості поверхневого шару. Найкращим і екологічно чистим методом є ультразвукове зміцнення, що формує в поверхневому шарі залишкові напруження стиску достатнього рівня при порівняно невеликому ступені наклепу. Метод при правильно підібраних режимах не змінює геометрію пера лопатки й має високу продуктивність.

Аналіз літературних джерел, присвячених дослідженням причин пошкоджуваності лопаток компресорів та взаємозв'язку їх витривалості із властивостями поверхневого шару, дозволив виявити ряд питань, які вивчені недостатньо або обсяг публікацій за якими обмежений:

- не досліджений процес формоутворення робочих лопаток компресорів з титанових сплавів методом ВШФ;
- немає рекомендацій з нейтралізації технологічних невідповідностей на поверхні пера лопаток після ВШФ;

- відсутні системні дослідження з формування властивостей поверхневого шару робочих лопаток компресорів сполученням ВШФ з різними оздоблювально-зміцнювальними обробками;
- немає нормативної документації на вибір раціональних методів і режимів оздоблювально-зміцнювальної обробки титанових лопаток компресорів, після ВШФ;
- відсутні дані про вплив режимів оздоблювально-зміцнювальних операцій на характеристики якості та опір втоми робочих лопаток компресорів, отриманих методом ВШФ;

На підставі аналітичного огляду публікацій була сформульована мета роботи, задачі та обраний напрямок досліджень.

У **другому розділі** визначений об'єкт дослідження, а також містяться методики досліджень, необхідні для вирішення поставлених задач.

Як типовий представник для досліджень була обрана робоча лопатка II ступені КВТ авіадвигуна Д-36, що виготовляється з титанового сплаву ВТ8. Приводиться опис умов експлуатації, конструкції лопатки, основні вимоги технічного контролю до матеріалу і стану поверхонь.

Методологічний підхід до поставленої мети роботи полягає в дослідженні закономірностей зміни характеристик якості поверхневого шару при різних варіантах операцій у технологічному процесі та оцінюванні ефективності технології виготовлення лопаток.

Досліджувалися такі характеристики якості поверхневого шару: точність форми, макро- і мікрогеометрія поверхні (наявність тріщин, виривів, ризок, шорсткість), напружений стан, ступінь і глибина зміцненого шару, мікроструктура.

Дослідження виконувалися на натурних лопатках і зразках, вирізаних з натурних лопаток (рис. 1), з використанням стандартних методик, що використовуються в авіадвигунобудуванні.

Границю витривалості при порівняльних випробуваннях на втому натурних лопаток визначали методом „сходінка” на базі $2 \cdot 10^7$ млн. циклів.

Обробку результатів експериментів робили за допомогою методів математичної статистики, а розрахунок та перевірку рівнянь лінійної множинної регресії – з використанням програми STATISTICA.

При обробці пера лопаток використовувався п'ятикоординатний високошвидкісний обробний центр Starrag-051B/C.

Інструментами при ВШФ профілю пера лопаток були: циліндричні фрези T121R08, T121R04, T121R25, T25 – для обробки хвостовика і для чорнових проходів в зоні пера; торцева конусна фреза з кутовим радіусом (тороїдальна) T10 і конічна сферична фреза K32 – для напівфінішної і фінішної обробки поверхонь пера.

Застосовувалися різні методи оздоблювально-зміцнювальних обробок лопаток, що включають: полірування, віброполірування, ультразвукове зміцнення. Обробка виконувалася на серійному устаткуванні ДП ЗМКБ “Івченко-Прогрес” та ВАТ “Мотор Січ” відповідно до технологічних операцій виготовлення лопаток.

Третій розділ присвячений дослідженню технології формоутворення поверхонь лопаток компресорів методом ВШФ.

Визначення кутів поворотних осей і координат розрахункової точки інструмента для формування траєкторій руху при обробці профілю пера лопаток ВШФ виконували для фрези зі сферичною ріжучою частиною і п'ятикоординатного верстата, що забезпечує керуючі поступальні переміщення інструмента щодо заготовки по трьох перпендикулярних напрямках і здійснює поворот інструмента навколо двох взаємно перпендикулярних осей.

Поверхню лопатки описували як сплайн NURBS поверхню. З деталлю пов'язана прямокутна система координат $X_d Y_d Z_d$ (рис. 2).

У результаті одержуємо координати розрахункової точки A на інструменті в системі координат деталі X_a, Y_a, Z_a .

Наступний крок – перетворення проекції вектора-вісі інструмента в кути поворотних столів верстата (рис. 3), координати розрахункової точки A із системи координат деталі в систему координат верстата з компенсацією виниклих при поворотах столів збільшень координат.

Значення кутів поворотних осей визначали з урахуванням необхідності установки вісі інструмента F паралельно вісі шпинделя верстата (рис. 4). Значення кута повороту навколо вісі X_m (стіл В) – $B = \arctg (J/K)$, а значення кута повороту стола А – $A = \arcsin (I)$.

При цьому координати розрахункової точки інструмента A :

$$X_m = Y_d \cdot \cos (B) - (Z_d \cdot \cos (A) + X_d \cdot \sin (A) \cdot \sin (B)) \cdot \sin (B);$$

$$Y_m = Z_d \cdot \sin (A) - X_d \cdot \cos (A);$$

$$Z_m = (Z_d \cdot \cos (A) + X_d \cdot \sin (A)) \cdot \cos (B) + Y_d \cdot \sin (B).$$

У результаті розрахунків отримані залежності для визначення кутів поворотних осей і координат розрахункової точки інструмента. За цими формулами розраховуються переміщення S_1, S_2 столів A і B , а також переміщення S_3, S_4, S_5 інструмента щодо заготовки, які забезпечують обробку поверхні пера лопатки.

За відомими емпіричними залежностями розраховані режими ВШФ для лопаток компресорів з титанових сплавів. Однак вони не є раціональними для ОЦ Starrag-051В/С. Найбільш раціональні режими ВШФ профілю пера лопаток компресорів, що забезпечують високу продуктивність, задану стійкість інструмента і необхідні параметри якості поверхневого шару (табл. 1) отримані в результаті аналізу та наступної експериментальної перевірки розрахункових значень.

Для одержання якісних характеристик поверхневого шару, забезпечення найбільш ефективного формування технологічних переходів й розроблення керуючих програм обрані стратегії та технологічні параметри обробки поверхонь лопаток компресорів, реалізація яких на ОЦ Starrag-051В/С можлива застосуванням різних модулів, при цьому:

- чорнова обробка пера виконується 3-х осьовими траєкторіями. При цьому положення в просторі проходів розраховуються таким чином, щоб мінімізувати припуск, що залишається, рівномірно розподіляючи його по поверхні лопатки;
- при напівчистовій обробці пера знімається частина припуску, що залишився, з метою згладжування кутів і ступеней поздовжнім переміщенням фрези уздовж осі лопатки. При цьому забезпечується рівномірний припуск по всіх оброблюваних поверхнях, що є однією з основних вимог, однак передбачається припуск на чистову обробку;
- чистову обробку пера і прикореневої частини здійснюється двома переходами, відповідно двома різними інструментами: паралельним круговим переміщенням фрези уздовж осі лопатки для обробки пера та поздовжнім переміщенням – для обробки кромки, а також для обробки прикореневої частини круговим переміщенням фрези уздовж осі лопатки. Для створення кращих умов різання задається кут випередження, тобто нахил фрези в напрямку руху, величина якого вибирається залежно від кривизни поверхонь, розмірів інструмента і необхідної якості поверхні. Чистова обробка виконується з перекриттям, перехід обробки пера наприкінці плавно відходить від поверхні пера, а перехід обробки прикореневої частини відповідно плавно підходить до поверхні пера (можливий уступ на стику переходів повинен бути мінімальним);
- формування прикореневої поверхні здійснюється круговим переміщенням інструмента уздовж осі лопатки;
- при обробці поверхонь хвостовика лопатки використовуються модулі для обробки призматичних і пересічних поверхонь.
- обов'язковим після фрезерних переходів є виконання контролю точності профілю безпосередньо на верстаті за допомогою вимірювального датчика Renishaw.

З урахуванням обраних стратегій і технологічних параметрів обробки розроблені основні етапи технології виготовлення робочих лопаток КВТ двигуна Д-36 методом ВШФ (рис. 5) і керуюча програма обробки профілю пера лопаток.

Експериментально визначені основні характеристики поверхневого шару профілю пера лопаток після ВШФ.

Установлено, що точність формування аеродинамічних поверхонь лопаток компресорів, що забезпечується після ВШФ, досягає величини не вище 0,04 мм та відповідає технічним вимогам на їх виготовлення. У процесі обробки забезпечується плавність переходу поверхонь спинки і корита пера, вхідних і вихідних кромки, а також поверхонь прикореневої зони лопаток.

Шорсткість поверхонь лопаток після ВШФ нерівномірна (по всьому периметрі спинки, корита і кромки). Є риси і мікронадриви, які притаманні лезвийній обробці (рис. 6), а шорсткість змінюється в діапазоні $R_a = 0,8 \dots 2,94$ мкм у результаті обробки різними інструментами прикореневої зони і пера.

Мікротвердість поверхні лопаток становить 3825 МПа, серцевини – 3304 МПа (рис. 7), отже, після ВШФ утворюється зміцнений шар, глибина якого порядку 8..10 мкм, відповідно ступінь наклепу – у межах 16..17,5 %.

Після ВШФ у поверхневому шарі пера лопаток утворюються залишкові напруження стиску, величина яких у поверхні не перевищує 280 МПа, а на відстані 10 мкм від поверхні максимальна і становить у середньому 297 МПа (рис. 8). Глибина поширення залишкових напружень стиску становить не більше 35 мкм.

Мікроструктура лопатки по всьому перетині пера рівносна, що складається з α і $\alpha + \beta$ фаз. У структурі поверхневого шару пера в результаті високошвидкісного фрезерування видимих змін не виявлено. Границі зерен і пластини β -фази при виході на поверхню свою спрямованість не змінили.

Таким чином, ВШФ лопаток компресорів з титанового сплаву ВТ8 забезпечує формування параметрів якості їх несучих поверхонь на досить високому рівні. Однак у процесі обробки зазначених поверхонь спостерігається нестабільність шорсткості, що надалі усувається наступною оздоблювально-зміцнювальною обробкою, під яку на профілі пера передбачений припуск 0,03 мм.

У **четвертому розділі** подані результати експериментальних досліджень впливу оздоблювально-зміцнювальних операцій на працездатність лопаток компресорів, отриманих методом ВШФ.

Дослідження властивостей поверхневого шару виконували після таких конкуруючих варіантів обробки: ВШФ+П (ручне полірування); ВШФ+ВП (віброполірування); ВШФ+П+УЗЗ (ультразвукове зміцнення).

Попередні дослідження показали, що комбінація П+УЗЗ є найбільш перспективною, тому що забезпечує найбільш сприятливе сполучення характеристик якості поверхневого шару. Тому надалі, розглядалися три варіанти обробки із УЗЗ на різних режимах (табл.2): ВШФ+П+УЗЗ1 на “м'якому” режимі; ВШФ+П+УЗЗ2 на “середньому” режимі; ВШФ+П+УЗЗ3 на “жорсткому” режимі.

Після УЗЗ, для нейтралізації технологічних мікрodefektів (рисок, задирок) на кромках і створення сприятливого мікрорельєфу поверхні зі слідами обробки спрямованими уздовж пера лопатки, доведення кромки лопаток виконували глянцюванням сізалевидами кругами з рідкими абразивними пастами уздовж кромки.

Результати вимірів шорсткості в поздовжньому і поперечному напрямках показали (табл. 3), що мікрорельєф поверхні лопаток після ВШФ+П більш рівномірний, ніж після ВШФ+П+УЗЗ, при яких спостерігалися сплески нерівностей, які чергуються, а величина R_a зростає, але не більше ніж на 0,1 мкм, що перебуває в межах технічних вимог на виготовлення лопаток ($R_a = 0,4$ мкм).

Після ВШФ+ВП мікропрофіль поверхні має більш згладжений характер, однак спостерігається збільшення шорсткості порівняно з іншими варіантами, більш ніж у два рази, що виходить за межі технічних вимог, внаслідок не повної нейтралізації слідів попередньої обробки. Збільшення висоти мікронерівностей може суттєво вплинути на границю витривалості лопаток убік її зниження. Варіанти оздоблювально-зміцнювальної обробки, що включають УЗЗ, стабілізують мікрорельєф поверхні лопаток більшою мірою, ніж обробка ВШФ+ВП, що запобігає зародженню в них мікротріщин.

Експериментально встановлено (рис. 9, 10), що при варіанті ВШФ+П+УЗЗ1, вплив УЗЗ призводить до незначного зниження абсолютного значення ступені наклепу порівняно з ВШФ+П, але в цей же час збільшилася глибина його розповсюдження. Після ВШФ+П+УЗЗ2 спостерігається найбільша ступінь наклепу, яка не перевищує припустиму для титанових сплавів (41 %). При обробці на “жорсткому” режимі (ВШФ+П+УЗЗ3) значення мікротвердості нижче, ніж при інших варіантах, що ймовірно пояснюється структурними змінами в поверхневому шарі. При ВШФ+ВП глибина і ступінь наклепу трохи нижче, порівняно з ВШФ+П+УЗЗ2, але все-таки перебуває на досить високому рівні.

Отримані експериментальні залежності описуємо поліномами третього ступеня виду $H_{\mu} = k_1h^3 + k_2h^2 + k_3h + k$ (табл. 4).

Глибина зміцненого шару змінюється від 18,8 мкм при обробці ВШФ+П до 39,7 мкм при обробці ВШФ+П+УЗЗ2. Варіанти обробки з УЗЗ дають підвищення глибини наклепу від 27,5...39...39,7 мкм (рис. 10).

Розподіл залишкових напружень по глибині поверхневого шару, отриманих в результаті ВШФ у комплексі з різними варіантами оздоблювально-зміцнювальної обробки (рис. 11) показує, що різні варіанти оздоблювально-зміцнювальної обробки забезпечують одержання залишкових напружень різного рівня: на поверхні від 210 МПа до 392 МПа, а максимальних від 292 МПа до 470 МПа.

Отримані експериментальні залежності добре описуються поліномами шостого ступеня виду $\sigma = k_1h^6 + k_2h^5 + k_3h^4 + k_4h^3 + k_5h^2 + k_6h + k_7$ (табл. 5).

Стабілізація напружень відбувається на різних глибинах від 42...45 мкм до 88...90 мкм.

Отже, найбільш прийнятним варіантом оздоблювально-зміцнювальної обробки з погляду досягнення експлуатаційної надійності лопаток є варіанти із застосуванням УЗЗ, оскільки глибина залягання залишкових напружень більша і ймовірність їх зняття в міру зношування менша. Крім того, стабілізація напружень по глибині поверхневого шару також сприяє його довговічності.

Порівняльні випробування на втому показали (рис. 12), що при обробці ВШФ+П+УЗЗ1 не відбувається зміни границі витривалості, порівняно з варіантом ВШФ+П, через недостатнє зміцнення поверхні пера лопаток, однак зменшується її розсіювання. При варіанті ВШФ+П+УЗЗ2 відбувається підвищення границі витривалості порівняно з ВШФ+П, зі зменшенням її розсіювання. Обробка ВШФ+П+УЗЗ3 призводить до перенаклепу тонких кромок, зі зниженням границі витривалості, порівняно з іншими варіантами.

Для можливості прогнозування ресурсу роботи лопаток компресорів, отриманих ВШФ з наступним поліруванням і ультразвуковим зміцненням, отримана та перевірена емпірична залежність впливу параметрів якості їх поверхневого шару на границю витривалості σ_{-1} :

$$\sigma_{-1} = 542 - 50,475R_a + 2,286 S - 0,147\sigma_{max} ,$$

де R_a – величина шорсткості поверхні, мкм; S – ступінь наклепу, %; σ_{max} – максимальні стискаючі напруження, МПа.

У **п'ятому розділі** наведений порівняльний аналіз собівартостей операцій як оздоблювально-зміцнювальних, так і в комплексі з ВШФ та одержанням заготовки. Показано, що найменша собівартість отримана при варіанті операцій: заготовка з круглого прокату+ВШФ+ВП, однак такий варіант неприйнятний, оскільки з іншими параметрах він не задовольняє технічним вимогам до виготовлення лопаток.

Розроблено технологічні рекомендації зі складання технологічних процесів виготовлення лопаток компресорів у дослідному виробництві, виконання яких забезпечує необхідну геометричну точність, параметри якості поверхневого шару, працездатність лопаток і високу економічну ефективність обробки.

Рекомендації включають: вимоги до устаткування й інструмента, рекомендації з вибору і призначення стратегій та технологічних параметрів обробки, вимоги до контрольних операцій і їх місця в технологічному процесі.

Виконується вибір найбільш раціональної структури технологічного процесу виготовлення лопаток компресорів на основі аналізу характеристик якості їх поверхневого шару, працездатності та собівартості (табл. 6).

Результати аналізу доводять, що найбільш прийнятною структурою технологічного процесу є: заготовка обтиснутий прокат +ВШФ+П+УЗЗ2.

Впровадження структури побудови і технологічних рекомендацій зі складання технологічних процесів виготовлення лопаток різних ступеней компресорів для ряду типів

двигунів зроблено в умовах дослідного виробництва ДП ЗМКБ "Івченко-Прогрес". Річний економічний ефект від впровадження становить 183205 грн.

ВИСНОВКИ

1. У дисертації отримане нове вирішення прикладної науково-технічної задачі технологічного забезпечення параметрів якості при виготовленні робочих лопаток компресорів з титанових сплавів в умовах дослідного виробництва, що полягає у формуванні характеристик поверхневого шару з урахуванням впливу технологічної спадковості, сполученням технологічних операцій високошвидкісного фрезерування з наступними оздоблювально-зміцнювальними обробками, що дозволило розробити гнучку технологію їх виготовлення.

2. Виконано комплексні дослідження, в результаті яких встановлені основні закономірності формування характеристик поверхневого шару, що дозволяють розробляти технологічні процеси виготовлення складнопрофільних деталей. Зокрема:

- при ВШФ можлива поява зсуву профілю пера лопатки залежно від базування;
- при неправильно обраних режимах високошвидкісного фрезерування можлива поява прижогів профілю пера лопаток, що призводять до утворення мікротріщин;
- ВШФ формує в поверхневому шарі залишкові стискаючі напруження, однак при цьому з'являється нестабільність шорсткості і технологічні концентратори напружень у вигляді рисок, задирок;
- полірування стабілізує шорсткість по всій поверхні пера лопаток, однак частково знижує рівень залишкових стискаючих напружень, глибина і ступінь наклепу при цьому також зменшуються;
- комбінація полірування зі зміцнювальною обробкою поліпшує характеристики якості поверхневого шару та міцність втомі, але ці характеристики залежать від різних варіантів оздоблювально-зміцнювальних обробок.

3. Визначені теоретичні залежності для знаходження кутів поворотних осей та координат розрахункової точки контакту фрези й деталі при формоутворенні профілю пера лопаток компресорів. Залежності дозволяють розраховувати переміщення робочих столів і інструмента щодо заготовки для забезпечення необхідної точності обробки при ВШФ.

4. Установлені раціональні режими високошвидкісного фрезерування поверхонь пера робочих лопаток компресорів на ОЦ Starrag-051B/C, що забезпечують необхідні параметри якості поверхневого шару.

5. Обрані та обгрунтовані стратегії і технологічні параметри обробки ВШФ різних поверхонь лопаток компресора, які дозволили намітити основні технологічні етапи й переходи обробки хвостовика і пера та розробляти керуючі програми.

6. Визначено раціональне сполучення оздоблювально-зміцнювальних обробок поверхонь пера лопаток після ВШФ, які є обов'язковими технологічними операціями для забезпечення якості робочих лопаток компресорів у дослідному виробництві.

7. На підставі результатів експериментальних досліджень за впливом оздоблювально-зміцнювальної обробки на величину границі витривалості впливає, що найбільш раціональним варіантом сполучення технологічних операцій є ВШФ+П+У332 на "середньому" режимі: $\tau = 5$ хв, $J_A = 60...65$ мА, з наступним глянцюванням кромки уздовж профілю пера

лопаток. При цьому границя витривалості підвищується на 25,5 %, зменшується його розсіювання в 2,7 раза порівняно з серійними лопатками ($\sigma_{-1} = 400$ МПа), а також поліпшується мікрорельєф поверхні.

8. Отримана емпірична залежність впливу параметрів якості поверхневого шару на границю витривалості лопаток, отриманих високошвидкісним фрезеруванням з наступною оздоблювально-зміцнювальною обробкою, що дозволяє прогнозувати ресурс їх роботи.

9. Обрана й обґрунтована раціональна структура типового технологічного процесу виготовлення лопаток компресорів з титанових сплавів на основі отриманих результатів експериментальних досліджень, що дозволило розробити технологічні рекомендації зі складання технологічних процесів. Впровадження результатів роботи в дослідне виробництво забезпечує річний економічний ефект – 183205 грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сахнюк Н.В., Яценко В.К., Зиличихис С.Д. Технологические особенности изготовления лопаток компрессора методом высокоскоростного фрезерования // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2004. вип. № 16. – С. 126-131.

Здобувачем проведені дослідження нової технології виготовлення робочих лопаток компресора.

2. Сахнюк Н.В., Зиличихис С.Д., Леонтьев В.А. Влияние погрешностей настройки станка и приспособления на точность обработки при высокоскоростном фрезеровании // Вестник двигателестроения. – 2004. № 3. – С. 25-27.

Здобувачем, на основі аналізу технологічного процесу були виявлені похибки при високошвидкісній обробці лопаток компресорів.

3. Сахнюк Н.В., Кондратюк Э.В., Зиличихис С.Д., Гребеников М.А., Орлов М.Р. Регулирование физико-механических характеристик лопаток компрессора, полученных методом высокоскоростного фрезерования // Вестник двигателестроения. – 2004. № 4. – С. 125-129.

Здобувачем була розроблена методика досліджень характеристик лопаток компресора та проведена обробка експериментальних результатів досліджень.

4. Сахнюк Н.В., Качан А.Я., Зиличихис С.Д., Леонтьев В.А. Анализ технологических процессов формообразования профиля пера лопаток компрессора // Технологические системы. – 2005. № 5-6 (31-32). – С. 7-9.

Здобувачем виконаний аналіз технологічного процесу формування лопаток компресорів газотурбінних двигунів з використанням високошвидкісного фрезерування.

5. Сахнюк Н.В., Качан А.Я. Качество поверхности при высокоскоростном фрезеровании лопаток компрессора из титанового сплава BT8 // Вестник двигателестроения. – 2006. № 2. – С. 81-84.

Здобувачем були проведені експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик лопаток компресора та обробка результатів досліджень.

6. Сахнюк Н.В., Грачев Ю.В., Качан А.Я. Определение траектории перемещения заготовки и инструмента для пятикоординатной высокоскоростной обработки поверхностей лопатки компрессора // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2007. № 2. – С. 139-141.

Здобувачем отримані рівняння для визначення кутів поворотних осей і координат розрахункової точки інструмента при обробці лопаток високошвидкісним фрезеруванням.

7. Сахнюк Н.В., Яценко В.К., Зиличихис С.Д. Технологические особенности изготовления лопаток компрессора методом высокоскоростного фрезерования // Тезисы II международной научно-технической конференции "Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку". Тезиси докладов г. Краматорськ, 2004. – С.110.

Здобувачем сформульовані технологічні особливості виготовлення лопаток компресора методом високошвидкісного фрезерування.

8. Сахнюк Н.В., Кондратюк Э.В. Обеспечение ударной прочности лопаток компрессора, полученных высокоскоростным фрезерованием // Тезисы III международной научно-технической конференции "Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку". Тезиси докладов г. Краматорск, 2005. – С.96.

Здобувачем виконаний аналіз результатів випробувань лопаток на удар після виготовлення їх за новою технологією.

9. Сахнюк Н.В., Качан А.Я. Высокоскоростное фрезерование лопаток компрессора // Збірник тез VIII міжнародної молодіжної науково-практичної конференції "Людина і космос" Ракетно-космічна техніка. Збірник тез м. Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2006. – С.305.

Здобувачем описано сутність нової технології виготовлення робочих лопаток компресора.

10. Сахнюк Н.В. Определение траектории перемещения заготовки и инструмента при обработке поверхностей лопаток компрессора высокоскоростным фрезерованием // "Молодежь в авиации: новые решения и перспективные технологии". Тезиси докладов. Международная молодежная научно-техническая конференция молодых специалистов авиамоторостроительной отрасли. – Запорожье-Алушта: изд-во ОАО "Мотор Сич", 2007. – С. 182.

Здобувачем сформульовані основні технологічні умови, необхідні для знаходження переміщень заготовки і інструмента при високошвидкісному фрезеруванні.

Усі публікації включають результати безпосередньої праці автора в процесі виконання окремих етапів дослідження і відображають основні наукові положення і висновки дисертації.

АНОТАЦІЇ

Сахнюк Н.В. Технологічне забезпечення якості лопаток компресорів в дослідному виробництві. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2008.

Дисертація присвячена дослідженню характеристик якості поверхневого шару, залежно від раціональної структури побудови технологічних процесів виготовлення робочих лопаток компресорів з титанових сплавів в дослідному виробництві.

Проведено аналіз причин передчасного руйнування робочих лопаток компресорів і виявлені технологічні фактори, що впливають на їх витривалість. Обґрунтовано застосу-

вання високошвидкісного фрезерування (ВШФ), необхідного устаткування і інструмента для обробки пера лопаток, а також засобів, для оздоблювально-зміцнювальних обробок.

Досліджено технологію формоутворення поверхонь лопаток компресорів методом ВШФ з дослідженням характеристик якості їх поверхневого шару.

Досліджено вплив сполучення ВШФ і оздоблювально-зміцнювальних методів на параметри характеристики якості поверхневого шару і працездатність лопаток. Отримана залежність границі витривалості, як функція параметрів якості поверхневого шару лопаток компресорів. Розроблені технологічні рекомендації зі складання технологічних процесів виготовлення лопаток компресорів в дослідному виробництві.

Результатом проведених досліджень є розробка гнучкої технології, що дозволяє скоротити цикл підготовки виробництва, зменшити собівартість виготовлення та підвищити працездатність.

Ключові слова: технологічний процес, якість, високошвидкісне фрезерування, лопатки компресора, титановий сплав, оздоблювально-зміцнювальна обробка, поверхневий шар, залишкові напруження, наклеп, границя витривалості.

Сахнюк Н.В. Технологическое обеспечение качества лопаток компрессоров в опытном производстве. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2008.

Диссертация посвящена исследованию характеристик качества поверхностного слоя, в зависимости от рациональной структуры технологических процессов изготовления лопаток компрессоров из титановых сплавов в опытном производстве.

Проведен анализ причин преждевременного разрушения рабочих лопаток компрессоров и выявлены технологические факторы, влияющие на их выносливость. Особо выделено влияние состояния подслоя материала и различных методов отделочно-упрочняющей обработки на характеристики качества поверхностного слоя и работоспособность лопаток.

Рассмотрены прогрессивные технологические процессы получения лопаток, в частности показаны особенности и возможности высокоскоростного фрезерования различных деталей.

Произведен и обоснован выбор оборудования для высокоскоростного фрезерования и инструментов, необходимых для обработки различных поверхностей пера лопаток, а также средств, для отделочно-упрочняющих обработок. Описаны методики исследований параметров качества поверхностного слоя и работоспособности лопаток.

Исследованы технологии формообразования сложнопрофильных поверхностей лопаток компрессоров методом ВСФ. В частности, определены зависимости для нахождения углов поворотных осей и координат расчетной точки инструмента при определении траектории движения, а также найдено влияние погрешности настройки станка и приспособления на точность при высокоскоростной обработке. Обоснован выбор заготовки для получения лопаток компрессоров ВСФ, определены режимы высокоскоростного фрезерования и намечены стратегии и технологические параметры обработки. Разработаны основные этапы технологии изготовления лопаток методом ВСФ, а также исследованы характеристики качества поверхностного слоя лопаток после ВСФ.

Исследовано влияние сочетания ВСФ и отделочно-упрочняющих методов на характеристики качества поверхностного слоя и работоспособность лопаток.

Разработаны технологические рекомендации по составлению технологических процессов изготовления лопаток компрессоров в опытном производстве, касающиеся выбора оборудования, инструмента, режимов, стратегий и технологических параметров обработки, а также требования к контрольным операциям и их месту в технологическом процессе.

Выбрана и обоснована рациональная структура типового технологического процесса изготовления лопаток.

Результатом проведенных исследований является разработка гибкой технологии, позволяющей сократить цикл подготовки производства, снизить себестоимость изготовления и повысить работоспособность. На основе этого можно разрабатывать технологические процессы изготовления лопаток компрессоров различных типоразмеров для вновь создаваемых авиационных двигателей.

Ключевые слова: технологический процесс, качество, высокоскоростное фрезерование, лопатки компрессора, титановый сплав, отделочно-упрочняющая обработка, поверхностный слой, остаточные напряжения, наклеп, предел выносливости.

Sakhnjuk N.V. Technological provision of compressor blades quality in a research production. – Manuscript.

Dissertation to compete for the degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.02.08 – mechanical-engineering. National technical university “Kharkivsky polytechnical institute”, Kharkiv, 2008.

Dissertation is dedicated to researching the characteristics of surface layer quality depending on rational philosophy of production processes for manufacturing the compressor rotor blades from titanium alloys in a research production.

Analyses of causes for premature failure of the compressor rotor blades has been carried out. Technological factors that influence their durability have been determined substantiated was the use of high-speed milling (HSM), equipment and tooling for machining the blade foil and techniques for finish – strengthening machining.

Researched was the shaping technology for compressor blades surfaces by HSM method along with investigation of quality characteristics of their surface layer.

The influence of combining HSM and finish-strengthening techniques on parameters of quality of surface layer characteristics and working capacity of blades have been studied. Obtained was the dependence of durability limit as the function of quality parameters for surface layer of compressor blades. Technological recommendation for formulation of the production processes of manufacturing the compressor blades in a research production have been developed.

Development of flexible technology that permits to shorten the cycle of preparation of production decreasing the prime cost of production and, increasing productivity is the result of researches carried out.

Key words: production process, quality, high-speed milling, compressor blades, titanic alloy, finish-strengthening machining, surface layer, residual stresses, hard working, durability limit.