

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Гончар Наталя Вікторівна

УДК 62-253:67.02

**ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ДИСКІВ КОМПРЕСОРІВ
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ШЛЯХОМ ВДОСКОНАЛЕННЯ
ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ**

Спеціальність 05.02.08 - технологія машинобудування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2010

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі "Технологія машинобудування" Запорізького національного технічного університету Міністерства науки і освіти України

Наукові керівники: доктор технічних наук, професор

Яценко Віктор Кузьмич

доктор технічних наук, професор

Внуков Юрій Миколайович

Запорізький національний технічний університет, завідувач кафедри "Технологія машинобудування"

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Сизий Юрій Анатолійович

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Технології машинобудування та металорізальних верстатів»

кандидат технічних наук

Маркович Сергій Євгенович

Національний аерокосмічний університет ім. Н.С. Жуковського «ХАІ», м. Харків, доцент кафедри «Технології виробництва авіаційних двигунів»

Захист відбудеться 10.06.2010 р. о 14.00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.12 в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"

Автореферат розісланий 07.05.2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Пермяков О.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Диски компресорів газотурбінних двигунів (ГТД) з пазами «ластівчин хвіст» є одними з відповідальних деталей, що визначають надійність і довговічність роботи усього двигуна. Основними перевагами пазів такого типу перед іншими конструкціями пазів, які використовуються в сучасних авіаційних двигунах, є їх технологічність, проте особливості форми таких пазів зумовлюють високий рівень конструктивної концентрації напружень. Значні експлуатаційні навантаження, а також несприятливе поєднання характеристик поверхневого шару паза, викликане важкою оброблюваністю жароміцних сплавів різанням і, як наслідок, несприятлива технологічна спадковість, що не враховується під час фінішної обробки дисків, дотепер є основними причинами руйнування дисків компресорів під час експлуатації, що спричиняють катастрофічні наслідки.

Завданню підвищення несучої здатності дисків компресорів приділяється значна увага фахівців в області машинобудування, але на сьогодні недостатньо науково-обґрунтованих рекомендацій щодо раціонального комплексу методів фінішної обробки і зміцнення деталей такого класу. Другим напрямком досліджень в цій області є також пошук оптимальної геометрії паза, що може бути ефективним рішенням задачі для нещодавно спроектованих двигунів, і прийнятно з економічної точки зору для двигунів, що знаходяться в серійному виробництві.

У зв'язку з цим завдання, спрямоване на підвищення несучої здатності дисків з пазами типу "ластівчин хвіст" конструктивно-технологічними методами, є важливим і актуальним науково-технічним завданням сучасного машинобудування, що складає напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі технології машинобудування Запорізького національного технічного університету у рамках процесу досліджень за НДР "Підвищення несучої здатності дисків компресора високого тиску зміцненням мікрокульками" №АО024/04-Д/3114, "Оцінка ефективності зміцнення міжпазових виступів дисків компресора при робочих температурах" №СО897/01-Д/4041 (ВАТ "Мотор Січ", м. Запоріжжя); "Дослідження процесу обробки деталей ГТД інструментом на основі полімерно-абразивних волокон і розробка технологічних рекомендацій" ДР №0108U001603, "Розробка технології обробки складнопрофільних деталей ГТД з жароміцних нікелевих і титанових сплавів інструментом на основі полімерно-абразивних волокон" ДР №0110U001146 (ДП ЗМКБ "Івченко-прогрес", м. Запоріжжя), в яких здобувач була відповідальним виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є вдосконалення технології фінішної обробки дисків компресора газотурбінних двигунів з пазами

типу "ластівчин хвіст" з нікелевих жароміцних сплавів, яка забезпечить формоутворення раціональної геометрії конструктивних елементів пазів і наведення сприятливих властивостей поверхневого шару для підвищення несучої здатності дисків.

Відповідно до встановленої мети були сформульовані наступні задачі:

- встановити причини руйнування пазів дисків в експлуатації і виявити основні чинники, що впливають на їх надійність і довговічність;

- дослідити механізм формування характеристик поверхневого шару деталей із сплаву ХН73МБТЮ-ВД на операціях фінішного етапу технологічного процесу;

- розробити модель релаксації технологічних залишкових напружень з урахуванням тривалої дії експлуатаційної температури і визначити діапазон ступеню наклепу з максимальною стабільністю залишкових напружень;

- розробити математичну модель опору втомленості міжпазових виступів диска з урахуванням геометричних параметрів формоутворюючих елементів і характеристик поверхневого шару;

- дослідити вплив різних схем і режимів комплексного зміцнення на характеристики поверхневого шару та опір втомленості, вибрати найбільш ефективну схему; визначити раціональну геометрію конструктивних елементів пазів типу «ластівчин хвіст», розробити методи їх формоутворення, що в поєднанні зі зміцненням забезпечить підвищення коефіцієнту запасу циклічної міцності міжпазових виступів;

- розробити рекомендації щодо формоутворюючих і зміцнюючих операцій фінішного етапу виготовлення пазів типу «ластівчин хвіст» та структуру технологічного процесу фінішної обробки дисків компресорів з пазами подібного типу, що забезпечує високу несучу здатність.

Об'єкт дослідження – технологічний процес фінішної обробки пазів типу "ластівчин хвіст" в дисках компресорів з жароміцних нікелевих сплавів.

Предмет дослідження – закономірності формоутворення конструктивних елементів пазів "ластівчин хвіст" і формування сприятливих властивостей поверхневого шару на фінішних операціях виготовлення дисків.

Методи дослідження: методи інженерної механіки – для дослідження фізико-механічних характеристик поверхневого шару і міцностних характеристик зразків; дослідження натурних зразків – для врахування технологічної спадковості; металографічні методи – для вивчення структурно-фазового складу поверхневого шару; методи математичної статистики – для обробки результатів випробувань і визначення математичних залежностей; чисельні методи – для розрахунку напружено-деформованого стану ободової частини диска і раціоналізації геометрії дрібнорозмірних конструктивних елементів пазів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що упер-

ше дано наукове обґрунтування комплексу технологічних методів забезпечення несучої здатності дисків компресорів з пазами типу "ластівчин хвіст", шляхом раціоналізації геометрії конструктивних елементів паза і наведення сприятливих властивостей поверхневого шару на етапі фінішної обробки.

При цьому отримані такі нові результати:

– розроблено математичну модель опору втомному руйнуванню міжпазових виступів з урахуванням характеристик поверхневого шару (параметра шорсткості Ra , ступеню поверхневого наклепу S_H , залишкових напружень $\sigma_{ост}$) і геометрії конструктивних елементів пазів (радіусу "викружки" R і величини фаски f), яка дозволила визначити їх раціональне поєднання;

– встановлено закономірності впливу режимів механічної (протягуванням, обробкою зенковкою і полімерно-абразивним інструментом) і зміцнюючої обробки (у псевдозрідженому шарі абразиву, ультразвуковим зміцненням сталевими кульками і пневмодробострумовим зміцненням скляними мікрокульками) на характеристики поверхневого шару пазів типу "ластівчин хвіст" з урахуванням технологічної спадковості, а також тривалої дії експлуатаційної температури (550 °С);

– розроблено схему визначення коефіцієнта запаса міцності n (як критерія несучої здатності) ободної частини дисків компресорів, яка враховує технологію обробки, режим роботи компресора, вплив робочої температури і тривалої її дії, що дозволило запропонувати технологію фінішної обробки дисків, яка забезпечує максимальний запас циклічної міцності при штатному і аварійному режимах роботи компресора.

Практичне значення одержаних результатів для машинобудування полягає в розробці технології комбінованої обробки полімерно-абразивними інструментами ободової частини дисків компресора з пазами типу "ластівчин хвіст" для видалення задирок після протягування пазів і скруглення гострих кромek радіусом заданої величини, що дало змогу відмовитися від ручної праці, механізувавши процес обробки, і значно підвищити витривалість міжпазових виступів. Розроблено і апробовано методику визначення залишкових напружень в складнопрофільних натурних зразках з пазами і міжпазовими виступами, яка дає можливість врахувати технологічну спадковість в деталях такого типу. Доведено стадійність процесу релаксації залишкових напружень для сплава ХН73МБТЮ-ВД і визначено діапазон ступіню поверхневого наклепу (25...40%), що забезпечує найбільшу стабільність залишкових напружень при дії експлуатаційних температур 550 °С. Розроблено і апробовано методику визначення раціональної геометрії дрібнорозмірних конструктивних елементів деталей ГТД за допомогою методу скінчених елементів, рішення контактної задачі "лопатка-диск" і методу підмоделювання пакету ANSYS, що значно прискорює швидкість проведення розрахунків. Визначено режими зміцнення в ультразвуковому полі сталевими

кульками і пневмодробострумової обробки скляними мікрокульками, і їх комбінації, яка забезпечила отримання сприятливих, з точки зору підвищення несучої здатності, властивостей поверхневого шару; розроблено технологічні рекомендації щодо застосування комплексного зміцнення складнопрофільних деталей на фінішних етапах їх виробництва.

Результати впроваджено на ВАТ "Мотор Січ" та ДП ЗМКБ "Івченко-прогрес", м. Запоріжжя, з економічним ефектом 242,7 тис. грн.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем самостійно. Серед них: планування експериментів, підготовка та проведення досліджень, обробка та аналіз отриманих результатів, їх впровадження.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати роботи доповідались на: VI Міжнародній науково-технічній конференції "New Structural Steels and Alloys" (Запоріжжя, 1995); VIII науково-технічній конференції "Неметалічні включення і гази в ливарних сплавах" (Запоріжжя, 1997); науково-технічній конференції "Ресурсо-енергозберігаючі технології в промисловості" (Одеса, 1997); X Міжнародній науково-технічній конференції "Машинобудування і техносфера XXI століття" (Севастополь, 2003); I...V Міжнародних науково-технічних конференціях "Нові технології, методи обробки і зміцнення деталей енергетичних установок" (Запоріжжя, 2000 і Алушта, 2002, 2004, 2006, 2008); III, VI, VIII, IX, XI, XII Міжнародних конгресах двигунобудівників (Рибаче, 1999-2008), VI Міжнародній науково-технічній конференції "Прогресивні технології життєвого циклу авіаційних двигунів і енергетичних установок" (Алушта, 2009).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи викладено в 23 наукових працях, з них 10 статей у наукових фахових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, 4 додатків, переліку джерел. Повний обсяг дисертації складає 195 сторінок; 81 ілюстрація та 28 таблиць за текстом; 4 додатки на 16 сторінках; 107 використаних літературних джерел на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, наукову новизну і практичну цінність роботи, приведено відомості щодо апробації опублікованих матеріалів дисертаційної роботи.

У першому розділі розглянуто особливості технологічних методів (термозміцнююча і хіміко-термічна обробка; нанесення зміцнюючих покриттів; поверхнево-пластична деформація) підвищення несучої здатності деталей машин; проаналізовано основні характеристики якості поверхневого шару (параметри шорсткості і напружено-деформованого стану) деталей ГТД,

конструктивно-технологічні параметри пазів типу "ластівчин хвіст", що впливають на витривалість міжпазових виступів, і їх технологічне забезпечення на формоутворюючих і фінішних етапах виготовлення.

Розглянуто особливості умов експлуатації дисків передостанніх ступенів компресора високого тиску. Матеріал, з якого їх виготовлено, жароміцний сплав на нікелевій основі ХН73МБТЮ-ВД, що забезпечує високі характеристики міцності і пластичності при тривалій роботі в умовах високих температур, проте неодноразово мали місце випадки дострокового вилучення дисків з двигунів у зв'язку з утворенням тріщин біля основи міжпазових виступів. Міжпазові виступи – це конструктивні елементи ободової частини диска, отримані в результаті протягування пазів

Рис. 1. Пази типу "ластівчин хвіст".

типу "ластівчин хвіст" під кутом 50° (рис. 1). У гострому куті в основі міжпазових виступів переважно і відбувається зародження втомних тріщин.

У другому розділі наведено детальні відомості про розроблені оригінальні та стандартні методики досліджень, які були застосовані в роботі, а також конструкції експериментальних зразків, оснастки і обладнання.

Основні дослідження виконувались на натурних зразках, вирізаних з диска компресора високого тиску, що дозволило врахувати технологічну спадковість від усього комплексу операцій формоутворення і зміцнення. Для раціоналізації режимів фінішно-зміцнюючих методів обробки застосовувалися стандартні плоскі лабораторні зразки.

Запропоновано схеми вирізки натурних зразків для досліджень параметрів шорсткості на профілометрі Perthometr-M3 та контуромірі НОМЕМEL-T8000 та ступіню поверхневого наклепу на мікротвердомірі ПМТ-3. Для дослідження структурно-фазового складу і фрактографічного аналізу використовували растровий мікроскоп JSM-T300. Для вивчення релаксаційних процесів і стабільності ефекту поверхневого зміцнення при експлуатаційній температурі диска (550°C), зразки піддавали тривалій термоекспозиції 50 і 500 годин, 550°C , повітря. Для оцінки розподілу залишкових напружень в поверхневому шарі дна паза, була запропонована оригінальна конструкція натурних зразків для пошарового травлення на приладі ПИОН-2 і розроблена методика розрахунку для них залишкових напружень по глибині. Для випробувань на втомленість при кімнатній (20°C) і експлуатаційній температурі (550°C) розроблено оригінальне пристосування для закріплення натурних зразків в віброелектродинамічному стенді ВЭДС-2000, що дозволяє випробовувати один зразок двічі, – з двох боків. Це значно зменшило кількість необхідних натурних зразків в кожній партії.

Визначення раціональної форми і розмірів конструктивних елементів пазів виконана чисельними методами з використанням теорії планування експериментів. Для математичної обробки результатів досліджень були вико-

ристані пакети комп'ютерних програм (STATISTIKA, Excel, MathCAD) і застосовані математичні методи факторного аналізу, теорії графів.

Третій розділ присвячено визначенню основних закономірностей формування характеристик поверхневого шару при варіюванні оздоблюючо-зміцнюючими методами (обробка в псевдозрідженому шарі абразиву – ПСА, зміцнення сталевими кульками в ультразвуковому полі – УЗЗ, пневмодробеструмове зміцнення стальними кульками – ПДЗ, і їх комбінації) і оцінці впливу досліджуваних характеристик на опір втомленості міжпазових виступів дисків компресора із сплаву ХН73МБТЮ-ВД з урахуванням впливу тривалої дії експлуатаційних температур (550 °С).

Дослідження таких параметрів шорсткості, як крок S_m , висота t_m і радіус западин ρ_m мікронерівностей, дають можливість оцінити коефіцієнт технологічної концентрації напружень $\alpha_{\sigma}^{mexh} = 1 + 2\sqrt{\gamma(t_m / \rho_m)}$, що характеризує плавність мікропрофілю поверхні, оскільки ризики, які залишаються після обробки, є технологічними концентраторами напружень (γ – коефіцієнт, що враховує відношення висоти мікронерівностей до кроку). Найбільш плавний профіль мікронерівностей і найменше значення параметра шорсткості Ra показала обробка УЗЗ, також за рахунок багатократних, відносно "м'яких" зіткнень кульок з поверхнями деталі забезпечила отримання стабільного ступіню поверхневого наклепу 28%. Мікроструктура поверхневого шару зразків досліджених партій не мала значних відмінностей, за винятком подрібнення зерен біля самої поверхні після УЗЗ і деякого збільшення розміру часток зміцнюючої інтерметаллідної γ' -фази після тривалої термоекспозиції.

Фінішні методи наводять в поверхневому шарі глибиною до 200 мкм залишкові напруження стискання величиною -400...-500 МПа, причому після ПСА спостерігається різке підповерхнє підвищення залишкових напружень (до -900 МПа), що негативно впливає на витривалість. Тривала термоекспозиція 500 год призводить до часткової релаксації залишкових напружень. В результаті дослідження стабільності ефекту зміцнюючої обробки протягом тривалої роботи при робочій температурі диска 550 °С була отримана математична модель релаксації технологічних залишкових напружень:

$$\sigma_{\tau}(S_H) = \sigma_0(\tau + 1)^{(-1,134 \cdot 10^{-4} S_H^2 + 8,81 \cdot 10^{-2} S_H - 0,198)}, \quad (1)$$

де σ_{τ} – значення залишкових напружень після релаксації, МПа; σ_0 – початкове значення залишкових напружень, МПа; τ – час, год; S_H – ступінь поверхневого наклепу, %.

Встановлено раціональний діапазон ступеню поверхневого наклепу 25...40%, при якому релаксація залишкових напружень мінімальна.

Для оцінки впливу варіантів оздоблюючо-зміцнюючих операцій на витривалість, були проведені порівняльні випробування на втомленість зразків з ободної частини диска компресора при температурах 20 °С і 550 °С. Ви-

соку границю витривалості забезпечило УЗЗ сталевими кульками (на 15...20% вище незміцнених партій).

Отримана в результаті досліджень велика кількість конструктивних параметрів і характеристик якості поверхневого шару, що формуються на етапах механічної і оздоблювально-зміцнюючої обробки в залежності від їх видів та режимів, значною мірою затрудняє раціоналізацію технологічного процесу фінішної обробки дисків компресорів і, зокрема, обробки пазів, за умовою максимальної витривалості. Для кожної з 10-ти партій зразків було отримано 14 різних параметрів. Для статистичної обробки та зменшення їх кількості, було застосовано метод багатовимірної статистики – факторний аналіз з використанням програми STATISTICA 6.0, що дозволило систематизувати численні дані, розділивши їх на три групи: *параметри мікрогеометрії поверхні*; *фізико-механічні властивості поверхневого шару*; *конструктивні параметри паза*. За допомогою теорії графів з параметрів усередині кожної групи було виключено корельовані чинники і виявлено незалежні, що найсильніше впливають на границю витривалості. В результаті залишилися п'ять чинників: шорсткість поверхні дна паза Ra , ступінь поверхневого наклепу S_H , залишкові напруження $\sigma_{ост}$, радіус "скруглення" R і розмір фаски f . Було отримано регресійні залежності, які складають математичну модель витривалості ободової частини диска компресора і визначають ступінь впливу кожного з виділених параметрів (рис. 2) на границю витривалості (критерій опору втомленості) міжпазових виступів:

Рис. 2. Графіки залежності σ_{-1} від R, f, Ra, S_H , та $\sigma_{ост}$.

$$\sigma_{-1} = (-231,5Ra + 303,5) \pm 23,9;$$

$$\sigma_{-1} = (1,98S_H + 94,7) \pm 25,3;$$

$$\sigma_{-1} = (-0,087\sigma_{ост} + 184,5) \pm 15,8;$$

$$\sigma_{-1} = (194,8R + 67,3) \pm 19,5;$$

$$\sigma_{-1} = (194,4f + 82,4) \pm 24,7.$$

Коефіцієнти знайдених рівнянь регресії можливо застосовувати тільки у діапазонах, які визначено дослідженими інтервалами параметрів $Ra, S_H, \sigma_{ост}, R, f$, вказаними на рис. 2. Усередині області допустимих значень параметрів ступінь впливу характеризується тангенсом кута нахилу кривих до осі абсцис β . Встановлені регресійні залежності можуть бути використані для прогнозування границі витривалості пазів дисків компресора, залежно від технології їх виготовлення.

На основі отриманої моделі, для підвищення опору втомленості і, відповідно, запасу циклічної міцності, як критерія несучої здатності дисків, необхідно забезпечити:

1) сприятливі властивості поверхневого шару і якості поверхонь, для чого в технологічному процесі виготовлення дисків потрібно передбачити оздоблювальні операції, що призводять до зниження шорсткості Ra робочих

поверхонь паза, та застосовувати такі зміцнюючі методи, які дозволять забезпечити раціональний ступінь наклепу S_H поверхонь паза і сформувати в них значні залишкові напруження $\sigma_{ост}$ стискування;

2) раціональну геометрію конструктивних елементів (радіусу "вікружки" R і радіусу r , що скругляє гострі кромки, або розміру фаски f) паза, для чого необхідно визначити оптимальні форму і розміри цих геометричних елементів паза та знайти технологічні можливості забезпечення їх отримання.

Четвертий розділ присвячено дослідженню технологічного забезпечення підвищення несучої здатності дисків компресора.

Перший напрям досліджень полягав в пошуку і варіюванні методами і режимами оздоблювальних і зміцнюючих операцій, якими можна регулювати та забезпечувати оптимальні параметри поверхневого шару: шорсткість, ступінь поверхневого наклепу, залишкові напруження і, в значній мірі, підвищувати опір втомленості деталей, що працюють при знакозмінних навантаженнях. Для цього запропоновано методи УЗЗ, ПДЗ та їх комбінація, що враховують складний профіль і важкодоступність поверхонь пазів, проведено вибір режимів УЗЗ і ПДЗ для наведення максимального значення залишкових стискуючих напружень, ступеня поверхневого наклепу, що виключає перенаклеп матеріалу, зі збереженням мінімальної шорсткості. Найкращі результати (табл. 1), показало комплексне зміцнення (партія Т4).

Таблиця 1

Параметри поверхневого шару і результати випробувань на втомленість

Номер партії	Варіанти зміцнення поверхні	R_a , мкм	S_H , %	$\sigma_{ост}$, МПа	σ_{-1} , МПа	β^y
T1	Без зміцнення, після полірування	0,15...0,16	—	45	220 (20°C)	—
T2	УЗЗ сталевими кульками	0,82...0,85	38	-370	310 (20°C)	1,41
T3	ПДЗ скляними мікрокульками	0,45...0,46	21	-330	253 (20°C)	1,15
T4	Комплексне зміцнення УЗЗ+ПДЗ	0,73...0,77	31	-475	374 (20°C)	1,7
T4+ t	Комплексне зміцнення УЗЗ+ПДЗ	0,76...0,81	32	-410	306 (550°C)	1,39

Коефіцієнти зміцнення визначали як відношення границь витривалості зміцненої і вихідної партії зразків.

Підвищення границі витривалості забезпечується також формуванням в поверхневому шарі рівномірно розподілених по глибині стискаючих залишкових напружень (рис. 3,а, партія Т4). Перепад напружень безпосеред-

ньо на поверхні зразків і в підповерхневій області мінімальний у разі комплексного зміцнення (рис. 3,б, партія Т4).

а) б)

Рис. 3. Епюри (а) та співвідношення залишкових напружень підповерхневого максимуму і на поверхні (б) зразків партій Т1, Т2, Т3, Т4.

Границя витривалості контрольної партії зразків Т4+т (табл. 1), зміцнених комплексно (УЗЗ + ПДЗ) і випробуваних при температурі 550 °С, дорівнювала 306 МПа, в порівнянні з такою ж партією Т4 ($\sigma_{-1}=374$ МПа), випробуваною при 20 °С, що в обох випадках значно вище за межу витривалості вихідної незміцненої партії Т1.

Таким чином, аналіз фізико-механічних характеристик поверхневого шару зразків, зміцнених різними способами, і випробування на витривалість показали, що технологія комплексного зміцнення поверхні, що включає послідовну обробку макро- і мікрокульками, з точки зору підвищення характеристик витривалості деталей з дослідженого сплаву є найбільш ефективною.

Другий напрям досліджень полягав в зниженні рівня діючих напружень в основі міжпазових виступів за рахунок забезпечення раціональної геометрії дрібнорозмірних конструктивних елементів пазів типу "ластівчин хвіст", таких як радіус "викружки" R і розміру фаски f (рис. 4), що отримують обробкою на останніх формоутворюючих операціях технологічного процесу.

Рис. 4. Радіус "викружки" R і фаска f паза.

Для аналізу існуючої технології їх формоутворення було проведено експериментальну оцінку стабільності геометрії "викружки" і фасок по контуру паза. Значення радіусу "викружки" R не виходили за межі зазначеного на кресленні допуску, завдяки жорсткій регламентації зміни протяжок до їх затуплення. Проте розміри фасок f виходили за границі допуску (до 12 % браку) і мали істотне розсіювання значень в межах одного диска, причиною чого є ручна операція зняття фасок зенкуванням. Одним з методів, який дозволить стабілізувати розміри фаски донної частини паза і "викружки", є механізація операції їх формоутворення.

З метою визначення раціональної геометрії паза за умови мінімального значення конструктивної концентрації напружень, аналізу напружено-деформованого стану, а також оцінки його зміни у зв'язку з нестабільністю геометрії пазів в межах диска, була розроблена і реалізована матриця планування чисельного двохфакторного експерименту: фактори – радіус "викружки" R і величина фаски паза f , що отримується зенкуванням. Як параметр оптимізації використовували коефіцієнт концентрації напружень K_{σ} .

Для аналізу напружено-деформованого стану і оптимізації дрібно-розмірних конструктивних елементів дисків було застосовано метод підмоделювання пакету ANSYS. Спочатку прораховували повнорозмірну модель

сектора диска з трьома лопатками, з навантаженнями, еквівалентними експлуатаційним, – відцентрові, інерційні, від газового потоку; також задавали контактну взаємодію "диск-лопатка". У цій моделі (рис. 5, а) були відсутні такі дрібнорозмірні елементи пазів, як фаски. Після проведення розрахунку отримані дані (напруження-деформації) переносилися на границі вирізу підмоделі (рис. 5,б).

а) б) в)

Рис. 5. Повнорозмірна модель сектора диска з лопатками (а), підмодель (б,в)

Подальший розрахунок підмоделей займав менше часу і ресурсів комп'ютера, ніж перерахунок повнорозмірних моделей. У підмоделях додавали і прибирали фаски, міняли їх розміри і розміри радіусу "викружки"; відповідно до плану експерименту було створено 15 варіантів підмоделей з різним поєднанням значень R і f .

В результаті розрахунків отримано (рис. 6) область оптимальних значень цих чинників. Величина радіусу "викружки" R , що отримують при ремонтній технології перепротягуванням, $R=1,0\dots 1,2$ мм і значення розміру фаски f понад 0,5 до 1,3 мм дають найменше значення коефіцієнта концентрації напружень в небезпечному перерізі моделі. При збільшенні радіусу "викружки" більше 1,3 мм проявляється ефект збільшення діючих напружень від зменшення перерізу основи міжпазового виступу.

Рис. 6. Залежність коефіцієнта концентрації напружень від параметрів R і f .

На виробництві фаска f є альтернативним технологічним рішенням – видалення гострих кромek пазу – замість формування радіуса скруглення r такої ж величини (рис. 7) через високі трудовитрати при його отриманні. Розрахунками доведено, що застосування радіусу скруглення дає коефіцієнт концентрації напружень підмоделей на 50% менше в порівнянні з підмоделями з фаскою того ж розміру (рис. 8).

Рис. 7. Розподіл напружень в основі міжпазового виступу при $R = 0,75$ мм, $r = 0,3$ мм.

Рис. 8. Залежність коефіцієнта концентрації напружень підмоделей з $R = 0,75$ мм від величини фаски f і радіусу скруглення r .

Наступними дослідженнями встановлено, що технологічно отримання стабільного радіусу скруглення заданої величини з метою видалення задирок і гострих кромek пазів після протягування та перепротягування можна забезпечити комбінованою обробкою дисковим (рис. 9) і чашковим полімерно-абразивними інструментами (ПАІ) на експериментально одержаних раціональних режимах. Висока ефективність їх роботи

Рис. 9. Дисковий ПАІ.

забезпечується завдяки твердим і гострим граням абразивних зерен, рівномірно розподілених в масі дуже гнучкого і міцного волокна типу поліамідний корд.

Застосування інструменту на основі полімерно-абразивних волокон дозволяє без особливої силової і теплової дії обробляти важкодоступні місця складнопрофільних елементів конструкції, такі як пази типу "ластівчин хвіст" (рис. 10,а), а також механізувати процес обробки, оскільки гнучкі волокна ПАІ значною мірою знижують вимоги до точності взаємного розташування деталі та інструменту. Після обробки натурних зразків (рис.10,б) було проведено виміри контура радіусу скруглення в різних місцях кромки паза. Результати контролю показали наступне: радіус скруглення – в кутових зонах "викружок" стабільний (0,4...0,5 мм) дещо менший ніж радіус скруглення дна паза (0,5...0,6 мм) через меншу кількість працюючих полімерно-абразивних волокон, що потрапляють у важкодоступні місця.

а)

б)

Рис. 10. Зразки із задирками після перепротягування пазів (а) і наступної комбінованої обробки дисковим і чашковим ПАІ (б).

Таким чином, для виготовлення пазів було запропоновано таку послідовність операцій: формоутворення пазів – протягування або ремонтне перепротягування; слюсарна операція – зняття задирок, притуплення гострих кромки і формування радіусу скруглення по контуру пазів комбінованою обробкою полімерно-абразивними інструментами; високотемпературний вакуумний відпал для зняття внутрішніх напружень після механічної обробки; комплексне зміцнення ободної частини (УЗЗ+ПДЗ).

Випробування на витривалість натурних зразків показали, що запропонована схема фінішної обробки, забезпечує підвищення границі витривалості міжпазових виступів на 20...25% ($\sigma_I = 244$ МПа) в порівнянні з діючою ($\sigma_I = 192$ МПа) технологією фінішної обробки. Це досягається заміною фаски на радіус скруглення раціональної величини і наведенням сприятливих властивостей поверхневого шару.

П'ятий розділ присвячено перевірці запропонованих рішень з точки зору підвищення несучої здатності, розробці рекомендацій і нової схеми технології фінішної обробки дисків компресорів з пазами типу "ластівчин хвіст".

Адекватна оцінка якості механічної і оздоблювально-зміцнюючої обробки деталей ГТД з урахуванням особливостей конструкції, умов навантаження на різних режимах роботи двигуна, а також зміни фізико-механічних характеристик поверхневого шару в умовах тривалої роботи при робочій температурі, може бути отримана шляхом визначення коефіцієнта запасу циклічної міцності, як критерія несучої здатності.

Коефіцієнт запасу циклічної міцності по подібному циклу n_{mod} (у разі,

якщо руйнівний і робочий цикл подібні, $\sigma_a' = n\sigma_a$, $\sigma_m' = n\sigma_m$ і по змінній напрузі n_a ($\sigma_a' = n\sigma_a$, $\sigma_m' = \sigma_m$) оцінювали за допомогою залежності:

$$n_{\text{год}} = \frac{\sigma_{-1} \cdot k_1 \cdot k_2}{\frac{K_\sigma}{\varepsilon\beta} \cdot \sigma_a + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_\sigma} \cdot \sigma_m}, \quad n_a = \frac{\sigma_{-1} \cdot k_1 \cdot k_2 - \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_\sigma} \cdot \sigma_m}{\frac{K_\sigma}{\varepsilon\beta} \cdot \sigma_a}$$

де σ_a – значення змінних напружень, діючих в зоні основи міжпазового виступу, в місці найбільшої концентрації напружень, МПа; σ_m – постійні напруження від відцентрових сил, тиску газового потоку і температури, що діють в зоні руйнування міжпазових виступів при робочій температурі і визначають асиметрію циклу навантаження, МПа; σ_a' , σ_m' – відповідно значення змінних і постійних напружень у момент руйнування, МПа; σ_{-1} – границя витривалості міжпазових виступів диска компресора при симетричному циклі навантаження, МПа; k_1 , k_2 – коефіцієнти, що враховують зниження границі витривалості в результаті тривалої дії робочої температури; K_σ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень; ε – коефіцієнт, що враховує масштабний чинник; β – комплексний коефіцієнт, що враховує вплив шорсткості поверхні і дії корозії; $\sigma_\sigma = 1050$ МПа – границя міцності сплаву ХН73МБТЮ-ВД при кімнатній температурі.

В результаті проведених розрахунків встановлено, що запропонований варіант фінішної технології обробки дисків – якісно виконаний радіус скруглення по контуру паза, радіус "викружки" і забезпечення сприятливих властивостей поверхневого шару – дає можливість істотно підвищити запас міцності міжпазових виступів в 3...5 разів при штатному режимі і в 1,3...2,5 рази при аварійному режимі роботи двигуна. Значне зменшення трудомісткості фінішного етапу технологічного процесу виготовлення дисків компресора з пазами типу "ластівчин хвіст" і практично повне виключення ручної праці та підвищення ресурсу дисків забезпечує річний економічний ефект 242,7 тис. грн. з урахуванням серійного і ремонтного виробництва.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення несучої здатності дисків компресора ГТД з жароміцного сплаву з пазами типу «ластівчин хвіст» за допомогою розробленого технологічного процесу фінішної обробки.

1. На основі системного аналізу літературних даних виявлено втомні причини руйнування дисків компресорів ГТД і основні чинники (параметри поверхні та поверхневого шару і геометрія складнопрофільних елементів ободної частини), що впливають на їх несучу здатність.

2. Проведено оцінку впливу фінішних методів обробки на формування характеристик поверхневого шару дисків з пазами типу «ластівчин хвіст» із сплаву ХН73МБТЮ-ВД; встановлено, що зміцнення сталевими кульками в ультразвуковому полі забезпечує отримання необхідних параметрів шорсткості, плавного мікропрофілю поверхонь, стискаючих залишкових напружень величиною -400...-500 МПа, ступеня поверхневого наклепу 28%.

3. В результаті дослідження релаксаційних процесів і оцінки стабільності ефекту зміцнюючих методів обробки при довготривалій дії робочих температур диска 550 °С, розроблено модель релаксації технологічних залишкових напружень і визначено діапазон ступеню наклепу 25...40%, при якому спостерігається максимальна стабільність залишкових напружень.

4. Встановлено закономірності впливу параметрів якості поверхневого шару і геометрії паза типу "ластівчин хвіст" (шорсткість поверхні Ra , ступінь поверхневого наклепу S_H , залишкові напруження σ_{ocm} , радіус "викружки" R і скругляючий гострі кромки радіус або фаска f) на границю витривалості міжпазових виступів. На основі розрахованих регресійних залежностей границі витривалості від Ra , S_H , σ_{ocm} , R , f , що складають математичну модель опору втомленості, запропоновано два напрями досліджень, що мають ціль підвищити несучу здатність дисків компресорів:

- в технологічному процесі передбачити зміцнюючі операції, що забезпечать необхідну якість поверхні і наведення сприятливих властивостей поверхневого шару;

- забезпечити технологічними методами отримання раціональної геометрії пазів з найменшим рівнем концентрації напружень в небезпечному перерізі.

5. Розроблено технологію комплексного деформаційного зміцнення ободової частини пазів диска (послідовна обробка сталевими кульками в ультразвуковому полі і пневмодробострумові зміцнення скляними мікрокульками), що забезпечує формування в поверхневому шарі сприятливих властивостей, зокрема, раціональної величини поверхневого наклепу 30...35%, рівномірно розподілених по глибині стискаючих залишкових напружень $\sigma_{ocm} = -500$ МПа, і шорсткості не нижче 8-го класу ($Ra=0,4...0,8$ мкм), границю витривалості підвищено на 20...25% при випробуваннях при кімнатній температурі і на 15...20% в діапазоні експлуатаційних температур (550⁺¹⁰ °С). Визначено раціональну геометрію конструктивних елементів пазів типу "ластівчин хвіст" – радіус "викружки" 0,6...0,8 мм для серійних дисків, 1,0...1,2 мм для ремонтних дисків і радіус скруглення кромки по контуру паза 0,4...0,6 мм замість фасок, що застосовувалися раніше. Розроблено рекомендації щодо методів їх формоутворення за допомогою комбінованої обробки дисковими і чашковими інструментами на основі полімерно-абразивних волокон та механізації цієї операції.

6. Розроблена математична модель несучої здатності ободної частини дисків компресорів з пазами типу "ластівчин хвіст", що враховує технологію обробки, режим роботи компресора, вплив робочої температури і її тривалої дії, що в сукупності дозволило розробити нову структуру технологічного процесу фінішного етапу виготовлення дисків компресорів з пазами подібного типу, що дозволяє забезпечувати їх високу надійність і довговічність.

7. Розроблена технологія фінішної обробки зменшує трудомісткість операцій, дає можливість практично виключити ручну працю, а також підвищити запас міцності ободної частини дисків компресора в 3...5 разів при штатному режимі і в 1,3...2,5 рази при аварійному режимі роботи двигуна, що в цілому дозволило отримати річний економічний ефект 242,7 тис. грн. з урахуванням деталей серійного і ремонтного виробництва.

Результати впроваджено на ВАТ "Мотор Січ" та ДП ЗМКБ "Івченко-прогрес", м. Запоріжжя.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гончар Н.В. Оценка повреждающего воздействия концентраторов напряжений в межпазовых выступах дисков компрессора / Н.В. Гончар, А.Г. Сахно, В.К. Яценко, // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя, ЗДТУ. – 1997. – №1-2.– С. 84-86. Здобувач виконала обробку результатів випробувань на втомленість.

2. Гончар Н.В. Эффективность технологических методов повышения качества поверхности и сопротивления усталости дисков ГТД из сплава ХН73МБТЮ-ВД / В.А. Богуслаев, В.К. Яценко, А.Г. Сахно, Н.В. Гончар // Проблемы прочности – 1998. – №5. – С. 126-133. Здобувач виконала дослідження параметрів наклепу.

3. Гончар Н.В. Статистический анализ факторов, определяющих характеристики выносливости дисков компрессора ГТД / Н.В. Гончар, В.В. Ткаченко, Д.В. Павленко, А.Г. Сахно // Вісник двигунобудування – 2004. – №1. – С. 67-71. Здобувач виконала статистичний аналіз експериментальних даних та розробила математичну модель витривалості міжпазових виступів.

4. Гончар Н.В. Выносливость ободной части дисков компрессоров из жаропрочного сплава ЭИ698-ВД в условиях рабочих температур / Н.В. Гончар, В.К. Яценко, Д.В. Павленко // Вісник двигунобудування – 2004. – №3. – С. 20-24. Здобувач проводила випробування зразків на втомленість та виконала обробку даних випробувань зразків на втомленість.

5. Гончар Н.В. Влияние технологии финишной обработки дисков компрессора с пазами типа «ласточкин хвост» на запас прочности при многоцикловом нагружении / Н.В. Гончар, В.В. Ткаченко, Т.И. Прибора // Вісник двигунобудування. – 2004. – №4. – С. 152-155. Здобувачем розроблена та

розрахована твердотільна модель та підмоделі диска методом скінчених елементів, а також проведено аналіз різноманітних фінішних методів з точки зору забезпечення запасу міцності.

6. Гончар Н.В. Применение факторного анализа для статистической обработки параметров пазов дисков компрессора / Н.В. Гончар // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – №9(25). – С.88-92. Здобувач виконала статистичний аналіз експериментальних даних.

7. Гончар Н.В. Технологические особенности комплексного упрочнения деталей ГТД / Н.В. Гончар, Д.В. Павленко, В.К. Яценко, В.В. Ткаченко // *Вісник двигунобудування*. – 2006. – №1. – С. 117- 122. Здобувач виконала обробку експериментальних даних досліджень залишкових напружень, даних випробувань зразків на втомленість.

8. Гончар Н.В. Исследование геометрических параметров пазов диска компрессора типа «ласточкин хвост» и определение их оптимального сочетания / Н.В. Гончар, Д.В. Павленко, М.А. Трубников, В.М. Чернецов // *Вісник двигунобудування*. – 2007. – №1. – С.60-65. Здобувач виконала статистичний аналіз експериментальних даних.

9. Гончар Н.В. Использование техники подмоделирования для оптимизации мелкогабаритных элементов деталей ГТД / Н.В. Гончар, Д.В. Павленко, Д.Н. Степанов, В.А. Шеларь // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2007. – №2. – С.150-154. Здобувач розробила методику розрахунку напружено-деформованого стану чисельним методом з використанням методу підмоделювання та вирішення контактної задачі «диск-лопатка».

10. Гончар Н.В. Оценка качества поверхности образцов из никелевого сплава после обработки полимерно-абразивным инструментом / Н.В. Гончар, Д.Н. Степанов, Е.А. Гончар, А.А. Шаталов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – №10/67 – С. 69-71. Здобувач провела дослідження параметрів шорсткості.

11. Гончар Н.В. Влияние микроконцентраторов напряжений поверхности на выносливость дисков компрессора: Збірник наукових праць. Випуск 30. Двигуни та енергоустановки. / Н.В. Гончар, А.Г. Сахно –Харків, ХАІ.– 2002.– С.97. Здобувач провела дослідження параметрів шорсткості та обробку експериментально отриманих результатів.

12. Гончар Н.В. Эффективность деформационного упрочнения дисков компрессора ГТД при воздействии эксплуатационных температур / Н.В. Гончар, А.Г. Сахно, В.К. Яценко // *Придніпровський науковий вісник* – 1997. – №53 (64). – С. 44-48. Здобувач проводила випробування зразків на втомленість та виконала обробку результатів випробувань.

13. Гончар Н.В. Модель релаксациии остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из сплава ХН73МБТЮ-ВД после ППД /

Н.В. Гончар, Д.В. Павленко // Упрочняющие технологии и покрытия. – Москва. – 2006. – №9. – С. 14-19. Здобувач виконала обробку результатів досліджень залишкових напружень, розробила методику їх розрахунку при пошаровому травленні в натурних зразках та математичну модель їх релаксації.

14. Гончар Н.В. Повышение несущей способности дисков ГТД упрочнением шариками в ультразвуковом поле / Н.В. Гончар, А.Г. Сахно, И.А. Стебельков, // "New Structural Steels and Alloys": Материалы VI Международной научно-технической конференции, 27-29 сент. 1995 г. – Запорожье – ч. 1. – С. 74. Здобувач проводила випробування зразків на втомленість.

15. Гончар Н.В. Регулирование содержания абразивных частиц в поверхностном слое дисков ГТД из сплава ХН73МБТЮ-ВД / Н.В. Гончар, В.К. Яценко, А.Г. Сахно // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах: Сборник научных трудов VIII научно-технической конференции, 9-11 сент. 1997. – С. 153-155. Здобувачем виконано експериментальне дослідження впливу фінішних методів обробки на шаржування поверхонь пазів.

16. Гончар Н.В. Влияние отделочно-упрочняющей обработки на сопротивление усталости дисков ГТД из жаропрочного сплава / Н.В. Гончар, Г.В. Пухальская, А.Г. Сахно // Ресурсо-энергосберегающие технологии в промышленности: Материалы конференции, 3-5 сент. 1997 г. – Одесса – ч. 2. – С. 55-56. Здобувач проводила випробування зразків на втомленість та обробку результатів дослідження.

17. Гончар Н.В. Особенности формирования физико-механических свойств и структуры поверхностного слоя при изготовлении дисков ГТД из жаропрочного сплава / Н.В. Гончар, А.Г. Сахно // Новые технологии, методы обработки и упрочнения деталей энергетических установок: Тезисы докладов I Международной научно-технической конференции, 23-27 октября 2000 г. – Запорожье. – С. 48-50. Здобувач проводила випробування на втомленість.

18. Гончар Н.В. Применение теории графов для оптимизации ряда факторов, влияющих на характеристики выносливости дисков компрессора из жаропрочного никелевого сплава / Н.В. Гончар, В.В. Ткаченко // Техносфера XXI века: Сборник трудов X международной научно-технической конференции, 8-14 сентября 2003 г. – Донецк–Севастополь. – т.3. – С. 194-197. Здобувач виконала статистичний аналіз експериментальних даних.

19. Гончар Н.В. Оптимизация геометрических элементов пазов типа «ласточкин хвост» на основании численных экспериментов / Н.В. Гончар, В.М. Чернецов, А.О. Калашник, // Людина і космос. Ракетно-космічна техніка: Збірник тез VIII Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції, 13-14 квітня 2006 р. – Дніпропетровськ, НЦАОМУ. – С. 75. Здобувачем розроблена та розрахована твердотільна модель та підмоделі, розроблено матрицю планування двофакторного експерименту.

20. Гончар Н.В. Оценка напряженно-деформированного состояния межпазовых выступов дисков компрессора с учетом эксплуатационных температур численным методом / Н.В. Гончар, Д.Н. Степанов, В.А. Шеларь // Молодежь в авиации: новые решения и передовые технологии: Тезисы докладов. Международная научно-техническая конференция молодых специалистов, 15-18 мая 2007г. – Алушта – С.41-42. Здобувач виконала оцінку напружено-деформованого стану деталі методом скінчених елементів.

21. Гончар Н.В. Статистический анализ результатов исследования процесса обработки образцов из жаропрочного сплава инструментом на полимерно-абразивной основе / Н.В. Гончар, Д.Н. Степанов, Д.Л. Сушко // Нові орбіти сучасного машинобудування. Питання новітніх технологій та обладнання в машинобудуванні: Матеріали міжвузівської конференції молодих вчених та студентів, 29 квітня 2008 р. – Кривий Ріг. – С. 22-23. Здобувач виконала статистичний аналіз експериментальних даних.

22. Гончар Н.В. Автоматизация операции снятия острых кромок радиусом скругления оптимальной величины в пазах типа «ласточкин хвост» дисков компрессора газотурбинных двигателей / Н.В. Гончар, Д.Н. Степанов // Молодежь в авиации: новые решения и передовые технологии: Тезисы докладов. II Международная молодежная научно-техническая конференция, 12-16 мая 2008 г. – Алушта. – С. 86-87. Здобувачем виконано оцінку напружено-деформованого стану деталі методом скінчених елементів.

23. Гончар Н.В. Розробка інтегрованої технології фінішної обробки дисків компресорів ГТД з пазами типу «ластівчин хвіст» / Н.В. Гончар // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: Збірник тез доповідей IX Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції, 26-27 листопада 2009р. – Запоріжжя. – С. 127-128. Здобувачем запропоновано нову схему технологічного процесу фінішного етапу виготовлення дисків компресорів з жароміцних сплавів.

АНОТАЦІЇ

Гончар Н.В. Підвищення несучої здатності дисків компресорів газотурбінних двигунів шляхом вдосконалення технології їх фінішної обробки. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків 2010.

Дисертація присвячена рішенню науково-технічної задачі, пов'язаної з підвищенням несучої здатності дисків компресорів з жароміцного нікелевого сплаву ХН73МБТЮ-ВД шляхом раціоналізації і технологічного забезпечення формоутворення конструктивних елементів пазів типу "ластівчин

хвіст" і сприятливих властивостей поверхневого шару.

Визначено раціональну форму і розміри конструктивних елементів пазів типу "ластівчин хвіст"; запропоновано і апробовано технологічне забезпечення їх формоутворення. Розроблено технологію комплексного зміцнення, що формує в поверхневому шарі сприятливі властивості, які забезпечують максимальну витривалість при кімнатній і експлуатаційній температурах. Застосування розробленої технології фінішної обробки підвищує несучу здатність і запас міцності ободової частини диска компресора в 3...5 разів при штатному режимі та 1,3...2,5 при аварійному режимі роботи двигуна.

Ключові слова: технологічний процес, фінішна обробка, диск компресора, пази типу «ластівчин хвіст», жароміцний сплав, опір втомленості, несуча здатність, якість поверхні.

Гончар Н.В. Повышение несущей способности дисков компрессоров газотурбинных двигателей путем совершенствования технологии их финишной обработки. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков 2010.

Диссертация посвящена решению научно-технической задачи, связанной с повышением несущей способности дисков компрессоров из жаропрочного никелевого сплава ХН73МБТЮ-ВД путем оптимизации и технологического обеспечения формообразования конструктивных элементов пазов типа «ласточкин хвост» и благоприятных свойств поверхностного слоя на финишном этапе технологического процесса изготовления дисков.

Установлены усталостные причины разрушения дисков в эксплуатации и выявлены основные конструктивно-технологические факторы, влияющие на их надежность и долговечность. Экспериментально установлены закономерности формирования характеристик поверхностного слоя и конструктивных элементов паза на финишном этапе технологического процесса и их влияние на предел выносливости межпазовых выступов. Разработана математическая модель сопротивления усталости межпазовых выступов диска.

Разработана методика определения остаточных напряжений натурных образцов послойным стравливанием и исследовано влияние длительного воздействия эксплуатационных температур на релаксацию остаточных напряжений поверхностного слоя ободной части диска. Установлена рациональная степень поверхностного наклепа, при которой релаксация остаточных напряжений минимальна.

С помощью метода конечных элементов определена рациональная форма и размеры мелкоразмерных конструктивных элементов пазов типа

«ласточкин хвост» с целью минимизации уровня конструктивной концентрации напряжений. Предложено и апробировано технологическое обеспечение их формообразования посредством комбинированной обработки дисковыми и чашечными инструментами на основе полимерно-абразивных волокон.

Разработана технология комплексного деформационного упрочнения пазов диска (последовательная обработка стальными шариками в ультразвуковом поле и пневмодробеструйное упрочнение стеклянными микрошариками), формирующая в поверхностном слое благоприятные свойства, которые обеспечивают максимальную выносливость межпазовых выступов при комнатной и эксплуатационной температурах.

Предложенная математическая модель коэффициента запаса циклической прочности ободной части дисков компрессоров с пазами типа "ласточкин хвост", учитывающая технологию обработки, режим работы компрессора, влияние длительного воздействия рабочей температуры, позволила разработать оптимальную структуру технологического процесса финишной обработки дисков компрессоров с пазами подобного типа, обеспечивающую их высокую надежность и долговечность. Применение разработанной технологии финишной обработки существенно уменьшает трудоемкость операций и долю ручного труда, а также повышает запас прочности ободной части диска компрессора в 3...5 раз при штатном режиме и 1,3...2,5 при аварийном режиме работы двигателя.

Ключевые слова: технологический процесс, финишная обработка, диск компрессора, пазы типа «ласточкин хвост», жаропрочный сплав, сопротивление усталости, несущая способность, качество поверхности.

Gonchar N.V. Increasing carrying capacity of compressor disks gas-turbine engine by improvement technique of finish processing. – Manuscript.

Thesis for a degree of the Candidate of Technical Sciences on speciality 05.02.08 – technology of mechanical engineering. – National Technical University "Kharkov polytechnic institute", Kharkov 2010.

The thesis is devoted to settling the scientific and technical problem of increasing load-carrying capacity of compressor disks made of heat-resistant nickel super-alloy ХН73МБТЮ-ВД by means of optimization and technological maintenance of shaping constructive elements of slots of dovetail type and favorable properties of the surface layer.

The rational combination of geometry of constructive elements of dovetail type slots was determined. The technological recommendations about methods for their shaping and the technique of complex hardening of disk slots, which creates favorable properties in the surface layer, which ensure the maximum endurance at operation temperatures were developed.

Applying the designed technique of finish processing raises carrying ca-

capacity safety margin of rim parts of compressor disk by 3 ... 5 times at normal mode and 1,3 ... 2,5 at emergency mode of engine operation.

The key words: technique finish processing, disk compressor, dovetail type slots, superalloy, endurance strength, carrying capacity, the surface quality.