

# Механіка, машинознавство та електропостачання

УДК 629.7.064.3

DOI: 10.30748/zhups.2018.58.10

В.І. Масягін<sup>1</sup>, М.Б. Сушак<sup>2</sup>, А.М. Ладик<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

<sup>2</sup> Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА НАЛАГОДЖЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЯКИХ ПРИ ІМПОРТОЗАМІЩЕННІ ЗДІЙСНЮЄТЬСЯ ЗА ДИРЕКТИВНИМИ ПРОЦЕСАМИ

*В даній статті представлено рекомендації щодо забезпечення надійності комплектувальних деталей, виготовлення, ремонт та випробування яких має бути освоєно вітчизняними підприємствами за директивними технологічними процесами в ході імпортозаміщення. А також проведено аналіз причин виникнення характерних відмов кожного типу газотурбінного двигуна з визначенням слабких місць в їх конструкції враховуючи умови експлуатації. Виділено важливі напрямки для забезпечення надійності, якості та стабільності при виробництві(ремонті) деталей.*

**Ключові слова:** імпортозаміщення, запас міцності, ремонт, надійність, ресурс, директивні технологічні процеси, ресурсні показники, еквівалентні випробування, вхідний контроль, технологічний запас.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На сьогодні, враховуючи те, що більша частина комплектуючих деталей, вузлів, які входять до складу конструкції газотурбінних двигунів (далі – ГТД) авіаційної техніки (далі – АТ) Збройних Сил України розроблені та виробляються в Російській Федерації, стало нагальним питанням щодо постачання еквівалентних штатним виробів з інших країн (диверсифікація закупівель) або налагодження вітчизняного виробництва останніх (імпортозаміщення). Зазвичай певна частина деталей (вузлів) в процесі ремонту авіаційних двигунів підлягає обов'язковій заміні (або в залежності від технічного стану). Зазвичай до таких виробів відносяться: елементи камер згоряння (гарячої частини ГТД), плунжерні пари насосів-регуляторів паливної системи, елементи паливної автоматики, підшипники, диски турбіни, робочі лопатки турбіни (далі – РЛТ).

Доцільно зазначити, що технологічні процеси виготовлення та випробувань особливо відповідальних деталей (збиральних одиниць) є директивними. Перелік деталей (збиральних одиниць), що виготовляються за директивним технологічним процесом, складається розробником, узгоджується з військовим представництвом Міністерства оборони України (далі – ВП МОУ) відповідно до [3], та включається в конструкторську документацію ГТД встановленим порядком.

**Аналіз літератури.** Виготовлення, ремонт, випробування та приймання авіаційних двигунів має

здійснюватися згідно з документацією розробника (виробника) за технологічними процесами, що розроблені відповідно до вимог стандартів, встановленої технічної документації та вимог технічних умов, які схвалені уповноваженим органом регулювання діяльності державної авіації України. При цьому слід враховувати, що, відповідно до [1], відмінено галузеву стандартизацію та запроваджено два види стандартів – національні стандарти та стандарти і технічні умови (далі – ТУ), які прийняті підприємствами, установами і організаціями.

В силових структурах України нормативно це питання врегульовано документом [2], що визначає порядок відновлення та взяття на облік конструкторської, технологічної і ремонтної документації авіаційної техніки державної авіації.

**Мета статті** – полягає у визначенні рекомендацій щодо забезпечення надійності комплектувальних деталей, виготовлення яких має бути освоєно вітчизняними підприємствами за директивними процесами.

### Виклад основного матеріалу

За статистичними даними частка відмов в експлуатації ГТД через виробничо-технологічні причини складає в середньому 30 % [4–5].

Для уникнення ризиків технологічного характеру, що можуть виникнути в процесі налагодження виробництва вищезазначених деталей на вітчизняних підприємствах мають бути враховані умови (характери) експлуатації АТ, яка буде відновлена з ви-

користанням цих деталей. Необхідно провести детальний аналіз причин виникнення характерних відмов кожного типу ГТД з виявленням слабких місць в їх конструкції за останні 5 років, коли інтенсивність експлуатації авіаційного парку дещо зросла порівняно з попереднім періодом.

Оцінюючи умови експлуатації, у випадку частих запусків ГТД – це призводить до накопичення теплових ударів, а як наслідок, до істотного зниження довговічності деталей гарячої частини двигуна та виникнення при помірних напрацюваннях дефектів турбіни. При тривалій роботі на режимі “Малий газ” виникає закоксування паливних форсунок, також падає тиск в запорних порожнинах ущільнювачів підшипникових вузлів, змінюються вісьові зусилля на підшипниках, що як результат призводить до раннього виходу з ладу ГТД.

У ряді випадків буває важко визначити причини відмов. Наприклад, поломка певної деталі може бути пов’язана з тим, що до її недостатньої конструктивної міцності додалось певне виробниче відхилення. Не завжди просто однозначно кваліфікувати фізичну причину відмови. Так, руйнування диску турбіни може бути не наслідком вибору недостатньо міцного матеріалу, а результатом незадовільної організації умов охолодження диску на всіх режимах роботи ГТД.

Велика кількість поломок турбінних лопаток мають втомлювальний характер. Ці поломки виникають внаслідок змінних напружень, що виникають в лопатках при їх коливаннях. У більшості випадків поломки лопаток пов’язані з їх резонансними коливаннями. Найбільш неприємні руйнування лопаток внаслідок коливань за основним тоном, при цьому відбувається обривання більшої частини або навіть всього пера лопатки (біля кореня). При інтенсивних коливаннях лопаток за основним тоном втомлювальним руйнуванням та розтріскуванням можуть піддаватись і замки лопаток. Причини вібраційних поломок турбінних лопаток далеко не завжди пов’язані з недостатнім закладеним запасом міцності. При виготовленні лопаток цей запас у ряді випадків може знижуватись через відхилення розмірів лопаток, а також припалинь (технологічних порушень в процесі термообробки), утворення у поверхневому шарі розтягуючих напружень та інших факторів, що знижують опір втомлюваності. Однією з причин зменшення запасів міцності в процесі експлуатації є корозійне ушкодження матеріалу лопаток, у тому числі газова корозія турбінних лопаток, яка викликана наявністю у паливах та продуктах їх згоряння хімічно активних з’єднань.

Руйнування бандажних лопаток найбільш часто пов’язане зі зменшенням у процесі напрацювання натягу по бандажах та появою зазору між ними через зношення робочих граней бандажних полок.

На турбінні лопатки діють, окрім змінних вібронапружень, також фактори, що призводять до накопичення ушкоджень: змінні термічні напруження, повторні статичні напруження при високих температурах, перегріву робочих лопаток (наприклад, місцеві – через нерівномірні по радіусу поля температур). Останні різко знижують опір тривалому статичному навантаженню, що може призвести до обриву лопаток із характерними слідами пластичної деформації. Перегріву соплових лопаток викликаються, зазвичай, кільцевою нерівномірністю температурного поля.

Тріщини та руйнування дисків турбін відносяться до найбільш небезпечних видів відмов, бо при обриві частини диску руйнування в багатьох випадках не локалізуються в межах корпусу двигуна. Часто, в процесі розвитку тріщин, в диску виникає збільшення рівня загальних вібрацій двигуна (з роторною частотою), що може служити діагностичною ознакою цієї відмови та дозволяє запобігти руйнуванню диска при своєчасному вимкненні двигуна. Двигун, при виявленні тріщини в диску, повинен, зазвичай, зніматись з експлуатації. Особливо небезпечні руйнування саме турбінних дисків, бо вони порівняно масивніші, ніж компресорні.

Одним з найбільш розповсюджених дефектів дисків турбін є розтріскування поверхні на дні пазів ялинкових замків. Причиною виникнення тріщин частіше за усе є термічна втомлюваність, що виникає в матеріалі при повторних термічних навантаженнях в момент запуску та зупинки ГТД.

Небезпечні руйнування дисків можуть бути наслідком перегріву та статичного перевантаження (наприклад, внаслідок перевищення обмежень частоти обертання ротору). Диски, що виготовлені з порушенням належного технологічного процесу, внаслідок тривалої роботи при високих температурах втрачають пластичність, що може призвести до їх крихкого руйнування навіть при відносно невеликому збільшенні статичної напруженості.

Збільшення вібрації двигунів повинні розглядатись як самостійна відмова (або несправність), якщо це не є наслідком іншої відмови, наприклад, обриву лопатки. Причиною виникнення підвищення вібрацій ГТД може бути зміна натягів по посадковим поясам роторних та статорних деталей, у тому числі ослаблення під дією відцентрових сил натягу дисків на своїх посадкових місцях. Високі вібрації можуть виникати в результаті появи при експлуатації двигуна критичних (близьких до робочих) частот обертання, наприклад, внаслідок недостатньої стабільності рівня жорсткості опор.

Ушкодження жарових труб камер згоряння ГТД зазвичай виникає від термічних напружень внаслідок високих градієнтів температури, а також різкими її змінами при запусках, прийомистості,

зупинках. При значних руйнуваннях жарових труб її фрагменти, що відділяються від них, можуть ушкодити лопатки турбіни. Інколи у високофорсованих камерах згоряння, особливо форсажних камерах авіаційних ГТД, можуть збуджуватись режими вібраційного горіння зі значною амплітудою коливань тиску та з частотою, що залежить від акустичних властивостей камери. Вібраційне горіння може призвести до значних руйнувань камери згоряння та інших елементів двигуна. У зв'язку з чим робота на режимі вібраційного горіння неприпустима. При вібраційному горінні автоколивання газового стовпа виникають в результаті того, що вихідний режим нестійкий по відношенню до малих збурень. Джерелами енергії, що підтримують автоколивання, можуть бути теплова та кінетична енергія потоку.

Однією з причин підвищеного зношення і виходу з ладу пар тертя, особливо в плунжерних насосах, є низька змащувальна властивість деяких палив. У більший мірі це відноситься до гідроочищених гасів, які, у зв'язку з цим, повинні використовуватись або з присадками, що підвищують їх змащувальні властивості, або у суміші з прямогонними паливами.

Загальною причиною відмов ряду агрегатів може також бути недостатньо висока якість комплектуючих виробів (виробів, виготовлених по імпортозаміщенню), які постачаються агрегатним заводам. Це такі вироби, як мембранні та сильфонні чутливі елементи, прецизійні малогабаритні підшипники, елементи електронних систем регулювання, гумовотехнічні вироби. Відповідно до вимог ГОСТ 21482-76, ймовірність безвідмовної роботи сильфонів, що виготовлені з трубок-заготовок зі зварним швом має бути не менше 0,99 за 60 000 циклів при навантаженні їх змінним внутрішнім тиском  $P_{\max}$ , що змінюється від 0 до  $0,5 P_{\max}$  при відсутності ходу. Корозійна (міжкристалічна) стійкість сильфонів, що мають виготовлятися із нержавіючої сталі регламентується вимогами ГОСТ 6032-84. Трубки-заготовки мають виготовлятися з листів підвищеної точності, що відповідають вимогам ГОСТ 5582-75.

Гума використовується як для ущільнення з'єднань рухомих і нерухомих елементів, так і в мембранних чутливих елементах. При цьому до якості сировини для виготовлення гуми висуваються дуже жорсткі вимоги, витримування яких є однією з умов забезпечення надійності агрегатів ГТД.

Враховуючи те, що на Україні існують потужні підприємства (ПАТ "Мотор Січ" та "Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро "Прогрес" ім. академіка О.Г. Івченка"), що здатні розробляти та налагоджувати виробництво перспективних ГТД досить актуальним є питання забезпечення надійності цих двигунів. Саме складне питання у розрахунку надійності двигуна, що проектується, це обгрун-

товане завдання параметрів надійності його елементів. Звісно, в ГТД незначна кількість основних елементів стандартизована та використовується на різних двигунах. Зазвичай труднощі із застосуванням статистичних даних про надійність тих чи інших елементів виникають тому, що у кожному новому двигуні ці елементи мають, як правило, нове конструктивне оформлення, інший рівень навантажень, виготовлені з іншого матеріалу, порівняно з аналогічними елементами ГТД, які експлуатуються. У зв'язку з цим, використання статистики про відмови елементів серійних двигунів при оцінці надійності нових ГТД, у багатьох випадках не може дати високої точності оцінки. Простіше, коли двигун, який проектується, є модифікацією серійного. У цьому випадку характеристики надійності елементів базового ГТД є підґрунтям для розрахунків щодо оцінки надійності двигуна, що проектується. Найбільш надійна інформація про відмови серійних двигунів в експлуатації може бути використана при розрахунках надійності нового ГТД, якщо в його конструкції застосовані не окремі деталі, а цілі вузли двигуна, що є прототипом. Це пояснюється тим, що більш доступна та достовірна інформація про характеристики надійності вузлів і систем ГТД, а не окремих деталей.

Великий інтервал розподілу критеріїв надійності елементів і систем різних ГТД вказує на необхідність ретельного відбору статистики з метою використання для розрахунків надійності двигунів інтенсивностей та параметрів потоку відмов тільки тих серійних елементів, які можливо впевнено вважати прототипом таких у новому двигуні. Але, навіть при цій умові, у двигуні, що проектується, деталі, взяті у прототипу, можуть бути виготовлені з іншого матеріалу та мати інший рівень навантажень. У цих випадках можуть вводитися поправочні коефіцієнти, які враховують зміну рівня надійності відповідного елемента типу

$$k_{\lambda} = \lambda_{\text{нов.}} / \lambda_{\text{прот.}},$$

де  $\lambda_{\text{нов.}}$  – очікувана інтенсивність відмов елементів або деталей двигуна, що проектується;

$\lambda_{\text{прот.}}$  – інтенсивність відмов елемента прототипу.

Величина  $k_{\lambda}$  (або  $k_{\omega}$ ), в залежності від характеру навантажень на елемент та причин його відмов, повинна, у більшості випадків, оцінюватися індивідуально для конкретних умов. Орієнтовна рекомендація може бути дана для деталей, відмови яких пов'язані з причинами міцнісного характеру. В цих випадках можливо оцінювати коефіцієнт  $k_{\lambda}$ , як

$$k_{\lambda} = k_{\text{прот.}} / k_{\text{нов.}},$$

де  $k_{\text{прот.}}$  та  $k_{\text{нов.}}$  – запас міцності деталі прототипу та нової деталі відповідно.

Коли вибрані значення критеріїв надійності ( $\lambda(t)$  та  $\omega(t)$ ), для всіх елементів, то, приймаючи розподіл напрацювання на відмову експоненційним, легко підрахувати для заданого часу (зазвичай часу виконання завдання) ймовірність безвідмовної роботи елементів, де  $\lambda(t)$  – інтенсивність відмов,

$$\lambda(t) = e^{-\frac{(t-T_0)^2}{2\sigma^2}} / \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-T_0)^2}{2\sigma^2}} dt,$$

де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення.

$\omega(t)$  – параметр потоку відмов;

$$\omega(t) = \frac{\Delta N_{\text{відм.}}(t, t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \text{ де } N(t) \text{ – кількість виробів,}$$

що мають напрацювання  $t$ ,  $\Delta N_{\text{відм.}}(t, t + \Delta t)$  – загальна кількість відмов виробів в малому інтервалі часу ( $t, t + \Delta t$ ).

В багатьох практично важливих випадках доцільно використовувати міру ресурсу, що зв'язана з запасами міцності. Ресурс ГТД визначається, в основному, ресурсом елементів гарячої частини двигуна (у першу чергу – лопаток та дисків турбіни). Тривала статична міцність при цьому є одним з найважливіших факторів, що впливають на ресурс турбіни. При невеликих величинах ресурсу ГТД перевірка надійності його (його основних вузлів) може здійснюватись тривалими випробуваннями за експлуатаційною програмою, тобто за програмою, що відображає в натурному масштабі часу режими роботи та навантаження, які будуть мати місце в типових умовах експлуатації двигуна. Але при величинах ресурсу, що дорівнюють тисячам та навіть десяткам тисяч годин, ресурсні випробування в натурному масштабі часу втрачають практичний сенс та замінюються прискореними, еквівалентними тривалим за витрачанням довговічності основних вузлів та деталей. При прискорених еквівалентноциклічних випробуваннях (далі – ПЕЦВ) із використанням найбільш важких експлуатаційних режимів роботи двигуна досягаються за короткий час такі ж пошкодження, що отримав би двигун за час виробітку ресурсу. ПЕЦВ дозволяють швидко виявити основні дефекти двигуна, перевірити заходи щодо їх усунення та оцінити міжремонтний (призначений) ресурс двигуна. Визначальним пунктом побудови методів проведення ПЕЦВ має бути узгоджене з практикою припущення про те, як витрачається ресурс двигуна, що випробовується, в залежності від умов проведення випробувань, тобто в залежності від режимів роботи, числа циклів навантаження та інше. Витрата ресурсу має бути однаковою для ПЕЦВ та роботи двигуна в експлуатації протягом імітуемого прискореним випробуванням ресурсу.

Встановлення об'єктивної міри вироблення ресурсу являє собою складну проблему, вирішення якої передбачає знання всіх процесів, що протікають

в робочих умовах та приводять до втрати працездатності при певному напрацюванні.

Для окремих елементів конструкції при зрозумілому характері їх навантаження поняття міри ресурсу більш-менш однозначно. Але для такої багатоконпонентної системи, як ГТД, закономірності накопичення ушкоджень кожного елемента та вузла врахувати досить важко через різні умови їх роботи та характер навантажень. Тому про міру ресурсу двигуна можливо говорити досить умовно. Оскільки умовою еквівалентності випробувань є рівність міри ресурсу, тому строго встановити умову еквівалентності випробувань двигуна досить проблематично.

В практиці випробувань використовуються процеси еквівалентних режимів для окремих вузлів та деталей при різних типах навантажень. В залежності від того, які елементи двигуна і які види їх навантаження прийняти як визначальні, що лімітують ресурс двигуна, можливі різні підходи до оцінки умов еквівалентності та складання програм прискорених випробувань. На практиці зазвичай використовуються компромісні підходи, де програми прискорених випробувань формуються у сполучення перевірок декількох лімітуючих довговічність різних елементів (вузлів) факторів.

Глибоке дослідження фізичних причин і картини виникнення та розвитку відмов, розробка на цій основі методів розрахунку, проектування та випробувань, які забезпечують максимальну працездатність конструкції, впровадження в процеси виробництва, експлуатації, обслуговування та ремонту двигунів інженерних методів і засобів забезпечення та підтримання високої надійності – це головні умови вирішення проблеми високої надійності ГТД.

Розподіл часу безвідмовної роботи при зношуванні може бути задовільно описаний нормальним розподілом, розподілом Вейбулла.

Експоненційний розподіл надійності:

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

(якщо  $\lambda = \text{const}$ , тоді  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ ).

Двопараметричний розподіл Вейбулла є більш гнучким, ніж експоненційний розподіл, який може розглядатися як окремий випадок першого.

Щільність розподілу Вейбулла:

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} e^{-t^m/t_0}$$

(якщо  $1/t_0 = \lambda$  та  $m = 1$ , тоді  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ ).

Величина  $1/t_0$  визначає масштаб, а  $m$  – асиметрію розподілу.

Генеральна характеристика – середній наробіток на відмову, що визначається з умови

$$T = \int_0^{\infty} e^{-t^m/t_0} dt$$

та дорівнює  $T = t_0^{1/m} \Gamma(\frac{1}{m} + 1)$ , де  $\Gamma(\frac{1}{m} + 1)$  – гама функція, що обчислюється за формулою

$$\Gamma(\frac{1}{m} + 1) = \int_0^{\infty} u^{1/m} e^{-u} du.$$

Основна характеристика процесу відновлення – це так звана функція відновлення  $H(t)$ , яка дорівнює середньому значенню кількості відмов виробу, тобто математичному очікуванню кількості відмов виробу за інтервал часу від 0 до  $t$ . Приблизне значення функції  $H(t)$  можливо знайти, якщо поділити загальну кількість відмов усіх однотипних виробів в інтервалі  $(0, t)$  що розглядаються, на кількість виробів. Її похідна  $\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt}$  зветься щільністю відновлення, параметром потоку відмов.

Можливо виділити два напрямки, за якими забезпечуються надійність ГТД при їх виробництві або ремонті.

Перший напрямок передбачає удосконалення технологічних процесів, в першу чергу це стосується отримання високої втомлювальної міцності та довговічності деталей, що виготовляються, особливо за рахунок оптимальної якості поверхневого шару, що істотно впливає на витривалість та інші міцнісні характеристики деталей ГТД.

Другий напрямок передбачає підвищення точності та стабільності на всіх етапах процесу виробництва, в тому числі методи контролю якості та регулювання сталого витримування технологічних процесів.

Питання удосконалення технологічних процесів щодо підвищення міцнісних характеристик деталей актуальні для ГТД у зв'язку з тим, що значна частина відмов ГТД пов'язана з руйнуванням високонавантажених елементів конструкції. Так, руйнування лопаток компресора та турбіни в багатьох випадках визначається недостатньою якістю технологічного процесу їх виготовлення. Якщо не розглядати грубі технологічні дефекти (такі, наприклад, як припали, закови інші), то аналіз причин руйнування деталей ГТД, в першу чергу – лопаток, показує, що домінуючу роль відіграють руйнування внаслідок недостатньої втомлювальної міцності, а для турбінних лопаток – також термоциклічної стійкості. В значній мірі ці властивості залежать від технології виготовлення деталей. При виливанні лопаток на ці властивості можливо впливати, забезпечуючи належну структуру матеріалу. Визначальний вплив на міцність, надійність та довговічність більшості високонавантажених деталей мають характеристики поверхневого шару (фізико-хімічні властивості, мікрогеометрія, залишкові напруження), які формуються під дією тих чи інших процесів обробки поверхні. При цьому, під поверхневим шаром розуміють ту

невелику периферійну зону матеріалу деталі, в якій фізико-хімічні та механічні властивості відрізняються від властивостей решти маси деталей. Ця зона може мати глибину від сотих частин міліметра до одного-двох міліметрів, але головний вплив на поведінку деталі мають шари, які безпосередньо прилягають до поверхні. Якість поверхневого шару формується протягом всього технологічного процесу. Показники якості змінюються під впливом різних операцій, але послідовне видалення при кожній з них шарів матеріалу, які сформовані при попередніх операціях, не повністю усувають утворені при цьому особливості.

Процеси зміцнення (наклепу) та утворення залишкових напружень у поверхневому шарі, величина та характер мікронерівностей поверхні визначається такими технологічними факторами, як величина припуску, геометрія інструменту, режим та кінематика процесу обробки. Але, оскільки характеристики поверхневого шару істотно впливають, наприклад, на витривалість деталей, то вона залежить тоді від характеру технологічного процесу, під дією якого формується поверхневий шар. Так у [6] досліджено вплив технології на втомлювальну міцність зразка з жароміцного сплаву ХН70ВМТЮ (ЭИ 617) при температурі  $750^\circ\text{C}$ . При цьому було з'ясовано, що при використанні технологічних процесів, які не дають розтягуючих залишкових напружень, межа витривалості збільшується. Максимальне значення межі витривалості відповідає зразкам, що оброблені електрохімічним способом із наступним електрополіруванням, при яких не виникають ані пластичні, ані пружні деформації у поверхневому шарі.

Говорячи про вплив точності та стабільності процесу виробництва деталей до ГТД в процесі їх ремонту на їх надійність, слід відмітити різноманітність проявів цього впливу. Так, недостатня точність виготовлення елементів системи регулювання призведе до порушення її функціонування; навіть при невеликому діапазоні частот власних коливань лопаток (через нестабільність їх розмірів та форми) на окремих екземплярах двигунів можуть виникнути небезпечні резонансні коливання цих лопаток; нестабільність механічних властивостей матеріалу заготовок дисків турбіни може призвести до неприпустимого зниження запасів їх міцності; відхилення в формі та розмірах деталей, які утворюють проточну частину компресора, ведуть до зниження запасів газодинамічної стійкості і т.ін. Звісно, що забезпечення точності та стабільності виробництва значним чином впливає на надійність ГТД.

В якості одного з прикладів впливу точності виготовлення деталей ГТД на їх навантаженість на рис. 1 показано зміну температури стінки литої охолоджуваної турбінної лопатки в залежності від товщини стінки [5]. З графіка видно, що зміна товщини

стілки вхідної кромки в межах  $\pm 0,2$ мм при вихідній товщині 1 мм призводить до зміни її температури майже на  $50^{\circ}\text{C}$ . Тому вимоги до точності лиття лопаток досить великі. Наприклад, стержні повинні виготовлятися з допуском по контуру  $\pm 0,05$ мм при мінімальній товщині 0,4мм.

Враховуючи високу складність та велику трудомісткість деталей ГТД, важливо забезпечувати контроль за ходом технологічного процесу, щоб мати можливість вплинути на цей процес. Контроль, що здійснюється після того, як деталь (вузол, агре-

гат) вже виготовлені, не може покращити їх якість, а лише дозволить усунути дефектні елементи.

Не зупиняючись на всьому комплексі методів контролю якості та стабільності, які застосовуються при виробництві (ремонті) ГТД, можливо виділити декілька важливих для забезпечення надійності напрямків: вхідний контроль; технологічні запаси (запаси точності); неруйнівний контроль стану особливо відповідальних деталей; управління розсіюванням вихідних даних.

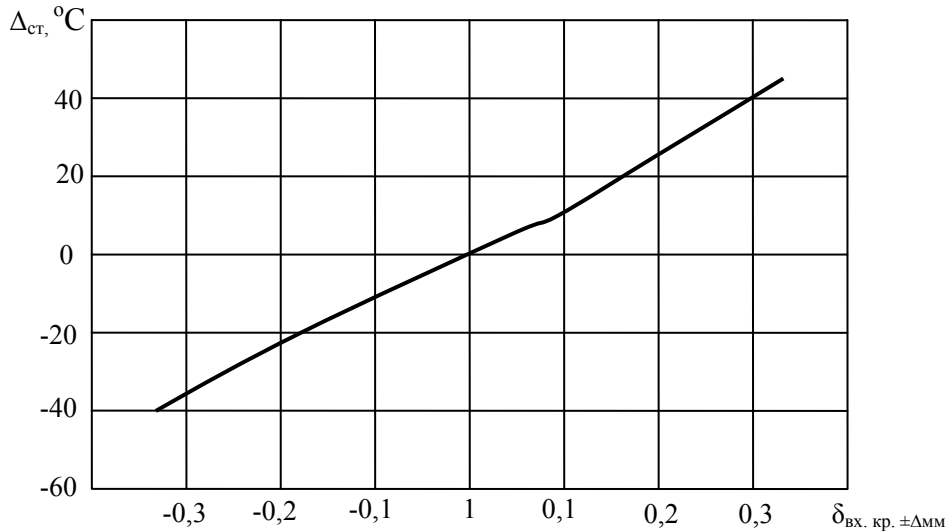


Рис. 1. Зміна температури вхідної кромки лопатки турбіни, що охолоджується в залежності від величини відхилення від її номінальної товщини

Охарактеризуємо кожний напрямок окремо.

1. Вхідний контроль здійснюється для того, щоб не допустити використання на підприємстві некондиційних матеріалів, заготовок, готових виробів, які надходять від постачальників-суміжників. Вхідний контроль не повинен дублювати контроль на заводах-постачальниках, а має бути спрямованим головним чином на виявлення та контроль якості, специфічних для окремих умов використання. Найбільш характерним для двигунобудівних (авіаремонтних) підприємств є вхідний контроль заготовок (матеріалів, сировини). При цьому завдання вхідного контролю [7] полягає, основним чином, у наступному: періодичне підтвердження кондиційності матеріалів та оцінка сталості якості; оцінка властивостей матеріалу, які відповідають специфічним вимогам, наприклад, вибір плавок для деталей, що відрізняються умовами виготовлення або використання; зіставлення характеристик вихідного матеріалу та готових деталей; отримання даних про необхідність пред'явлення додаткових вимог до якості матеріалу.

Головна мета вхідного контролю полягає в тому, що він дозволяє вплинути на процес виробництва на самому початковому етапі, у тому числі не

допустити виготовлення деталей з некондиційних матеріалів та заготовок.

2. Технологічні запаси мають забезпечувати гарантоване отримання в процесі виробництва заданих значень конструктивних параметрів. Досягаються технологічні запаси призначенням виробничих допусків, менших, ніж конструктивні допуски, та таким проектуванням технологічних процесів, при якому між можливим, з урахуванням усіх виробничих похибок, відхиленням конструктивного параметра та його регламентованим значенням залишався б деякий запас. У зв'язку з можливими неточностями контролю, не завжди контрольованим зниженням точності обладнання бажаність технологічних запасів очевидна. Однак, тут повинен бути розумний компроміс, пов'язаний з обмеженими технологічними можливостями та зниженням економічності виробництва. Технологічні запаси слід надавати на найбільш важливі геометричні параметри, відхилення яких за межі поля допуску впливає на надійність ГТД.

3. Неруйнівний контроль якості деталей широко використовується при виробництві ГТД у зв'язку з неможливістю контролю виконання ряду вимог до

особливо відповідальних деталей (лопаток, дисків і т.ін.). тільки за результатами визначення їх розмірів і форми.

Для виявлення поверхневих дефектів типу мікротріщин (починаючи з тріщин шириною 0,001мм та глибиною 0,01мм), спор, пухкостей і т.ін. використовуються так звані капілярні методи.

Для виявлення раковин, пухкостей, неметалевих та шлакових включень використовуються радіаційні методи контролю.

Існуючі акустичні методи, які базуються на реєстрації пружних коливань, що виникають в процесі контролю деталей, використовують для визначення розривів суцільності, структурного аналізу матеріалу (наприклад. розміру зерен), вимірювання товщини при односторонньому доступі до деталей.

Використовуються також магнітні та електромагнітні (вихрових токів) методи неруйнівного контролю.

Використання широкого арсеналу неруйнівних методів та засобів контролю якості матеріалу готових виробів є важливим фактором забезпечення надійності ГТД при їх виробництві (ремонті), які дозволяють виявити приховані дефекти, що знижують працездатність деталей ГТД.

Узагальнюючи, в якості прикладу, зазначаються наступні рекомендації щодо забезпечення надійності робочих лопаток турбіни ГТД, які можуть бути виготовлені за директивним технологічними процесами в ході імпортозаміщення на одному з вітчизняних підприємств:

контроль якості на підприємстві, яке освоює виробництво директивних деталей, повинне передбачати здійснення контролю матеріалів (сировини), покупних виробів, які застосовуються в процесі виробництва на всіх його етапах у суворій відповідності з діючою документацією та затвердженими зразками РЛТ;

відділ технічного контролю, інші служби виробника (ремонтної організації), ВП МОУ має здійснювати контроль якості виготовлення двигунів підприємством-виробником у відповідності з діючою нормативною, конструкторською, технологічною та іншою документацією (технологічними процесами, інструкціями, методиками і таке інше). ВП МОУ відповідно до [3] надається право контролювати якість продукції та її відповідність технічній документації на всіх етапах виробництва;

періодично службами розробника (виробника) мають здійснюватися роботи з контролю якості виготовлення робочих лопаток турбіни, а саме: комплексна перевірка відповідності технології виробництва діючій документації і дотримання на робочих місцях технологічних процесів, виробничих інструкцій, виконання графіків перевірки виробничого обладнання та оснастки, стану випробувальних

стендів та установок, контрольно-вимірювальної апаратури та забезпечення робочих міст і контрольних постів контрольно-вимірювальним інструментом та апаратурою, що пройшла метрологічну перевірку;

службами виробника повинен здійснюватися контроль стабільності виробництва шляхом:

– періодичних випробувань окремих деталей поточного виробництва на міцність та надійність (визначення залишкових напружень в робочих лопатках турбіни, визначення частотних характеристик та меж витривалості робочих лопаток турбіни, циклічні випробування замкових з'єднань робочих лопаток турбіни в об'ємі, що встановлений розробником (виробником) відповідно до діючої нормативної документації, узгодженої з ВП МОУ;

– періодичних розрізів заготовок РЛТ для перевірки якості матеріалу на відповідність технічним вимогам креслень та технічної документації. Об'єм та графік зазначених перевірок, перелік деталей та об'єм вибірок для конкретного типу РЛТ складаються виробником та узгоджується розробником та ВП МОУ;

– аналізу статистичної обробки результатів вхідного контролю матеріалів для уточнення технічних умов на них, також контролю покупних виробів в об'ємі, що передбачений технічною документацією;

– атестації технологічних процесів виготовлення РЛТ за документацією виробника;

– аналіз причин дефектів та недоліків у виробництві, ремонті та експлуатації;

– проведення періодичних випробувань.

За результатами проведених робіт виробник спільно з розробником відпрацьовує заходи з забезпечення сталості виробництва та узгоджує їх із ВП МОУ.

РЛТ повинні проходити щорічну контрольну перевірку на відповідність кресленням та технічним умовам. Перевірка здійснюється за узгодженим з ВП МОУ переліком у відділі метрології (центральної вимірювальної лабораторії) (далі – ЦВЛ) виробника, а також цехових пунктах контролю.

При перевірці в ЦВЛ, за згодою з ВП МОУ, піддаються вимірюванню також розміри, які згідно з ТУ креслення забезпечується інструментом або технологічно (при можливості засобів вимірювання та наявності бази вимірювання).

Вхідний контроль матеріалів та напівфабрикатів повинен здійснюватися відповідно до ГОСТ 24297-87.

Для перевірки розроблених технологічних процесів виготовлення РЛТ, перевірки відповідності двигунів вимогам конструкторської документації проводяться кваліфікаційні випробування. Для перевірки працездатності виготовлених іншим підприємством

емством РЛТ в процесі імпортозаміщення, необхідно проводити типові (технологічні) випробування.

## Висновки

Представлені в статті результати можуть бути рекомендовані для їх застосування на етапах визна-

чення міжремонтного ресурсу ГТД в процесі відновлення авіаційної техніки на вітчизняних АРП при імпортозаміщенні (налагодженні виробництва) комплектуючих виробів, рівень надійності яких є визначальним для двигуна.

## Список літератури

1. Закон України “Про стандартизацію” №1315-VII від 05 червня 2014 року.
2. Наказ Міністерства оборони України від 13.10.2014 року № 732 “Про затвердження Порядку відновлення та взяття на облік конструкторської, технологічної і ремонтної документації авіаційної техніки державної авіації, за якою не здійснюється авторський нагляд”.
3. Постанова Кабінету Міністрів України від 21 жовтня 2009 р. № 1107 “Про затвердження положення про представництва державних замовників з оборонного замовлення на підприємствах, в установах і організаціях”.
4. Справочник по надёжности / пер. с англ.; под ред. Б.Е. Бердичевского. Т. 1. – М.: Мир, 1969. – 329 с.
5. Справочник по надёжности / пер. с англ.; под ред. Б.Е. Бердичевского. Т. 2. – М.: Мир, 1970. – 304 с.
6. Справочник по надёжности / пер. с англ.; под ред. Б.Е. Бердичевского. Т. 3. – М.: Мир, 1970. – 376 с.
7. Акимов В.М. Основы надежности газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
8. Рахмарова М.С. Влияние технологических факторов на надежность лопаток газовых турбин / М.С. Рахмарова, Я.Г. Мирер. – М.: Машиностроение, 1966. – 223 с.
9. Дарчинов Э.Н. Специфика входного контроля и вопросы его стандартизации / Э.Н. Дарчинов // Стандарты и качество. – 1973. – № 8. – С. 24-26.
10. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора: моногр. Часть 1 / А. В. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк, В.И. Колесников, В.К. Яценко, А.Я. Качан, Э.И. Цивирко, М.Р. Орлов, В.Е. Замковой, В.Ф. Мозговой, О.В. Рубель. – Запорожье, изд. ОАО “Мотор Сич”, 2003. – 396 с.
11. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины: моногр. Часть 2 / А.В. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк, В.К. Яценко, А.Я. Качан, Э.И. Цивирко, С.Б. Беликов, М.Р. Орлов, В.Е. Замковой, В.Ф. Мозговой, О.В. Рубель. – Запорожье, изд. ОАО “Мотор Сич”, 2003. – 420 с.
12. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: моногр. / А.В. Богуслаев, А.А. Олейник, А.А. Олейник, Д.В. Павленко, С.А. Субботин; под ред. Д.В. Павленко, С.А. Субботина. – Запорожье: ОАО “Мотор Сич”, 2009. – 468 с.

## References

1. The Law of Ukraine (2010), “*Pro standartyzatsiiu*” [About standardization], No. 1315-VII vid 05 chervnia 2014.
2. The Order of the Ministry of Defense of Ukraine (2014), “*Pro zatverdzhennia Poriadku vidnovlennia ta vziattia na oblik konstruktor-skoi, tekhnolohichnoi i remontnoi dokumentatsii aviatsiinoi tekhniki derzhavnoi aviatsii, za yakoiu ne zdiisniuietsia avtorskyi nahliad*” [On Approval of the Procedure for the Recovery and Registration of Design, Technological and Maintenance Documents of State Aviation Equipment, which is not subject to author's supervision], No. 732 vid 13.10.2014.
3. The Resolution of the Cabinet Ministers of Ukraine (2009), “*Pro zatverdzhennia polozhennia pro pred-stavnytstva derzhavnykh zamovnykiv z oboronnoho zamovlennia na pidpriemstvakh, v ustanovakh i orhanizatsiakh*” [On Approval of the Provision on Representative Offices of Government Customers for Defense Orders in Enterprises, Institutions and Organizations], No. 1107 vid 21 zhovtnia 2009.
4. Berdychevskiy, B.E. (1969), “*Spravochnyk po nadėzhnosti*” [Reliability Guide], T. 1, Myr, Moscow, 329 p.
5. Berdychevskiy, B.E. (1970), “*Spravochnyk po nadėzhnosti*” [Reliability Guide], T. 2, Myr, Moscow, 304 p.
6. Berdychevskiy, B.E. (1970), “*Spravochnyk po nadėzhnosti*” [Reliability Guide], T. 3, Myr, Moscow, 376 p.
7. Akimov, V.M. (1981), “*Osnovy nadezhnosti hazoturbynykh dvyhatelei*” [Fundamentals of reliability of gas turbine engines], Mechanical Engineering, Moscow, 207 p.
8. Rakhmarova, M.S. and Myrer, Ya.H. (1966), “*Vlyanye tekhnolohycheskykh faktorov na nadezhnost lopatok hazovykh turbyn*” [Influence of technological factors on the reliability of gas turbine blades], Mashynostroeniye, Moscow, 223 p.
9. Darchynov, E.N. (1973), “*Spetsyfyka vkhodnoho kontroliia y voprosu eho standartyzatsyy*” [Specifics of entrance control and questions of its standardization], *Standards and quality*, No. 8, pp. 24-26.
10. Bohuslaev, A.V., Muravchenko, F.M., Zhemaniuk, P.D., Kolesnykov, V.Y., Yatsenko, V.K., Качан, А.Я., Тсывирко, Е.Я., Орлов, М.Р., Замковой, В.Е., Мозговой, В.Ф. and Rubel, O.V. (2003), “*Tekhnolohycheskoe obespechenie ekspluatatsyonnykh kharakterystyk detalei HTD. Lopatky kompressora y ventylia-tora: monohrafiia. Chast 1*” [Technological support of operational characteristics of parts of the CCD. Compressor and fan blades: monograph. Part 1], ОАО “Motor Sych”, Zaporozhe, 396 p.
11. Bohuslaev, A.V., Muravchenko, F.M., Zhemaniuk, P.D., Yatsenko, V.K., Качан, А.Я., Тсывирко, Е.Я., Беликов, С.Б., Орлов, М.Р., Замковой, В.Е., Мозговой, В.Ф. and Rubel, O.V. (2003), “*Tekhnolohycheskoe obespechenie ekspluatatsyonnykh kharakterystyk detalei HTD. Lopatky turbynu: monohrafiia. Chast 2*” [Technological support of operational characteristics of parts of the CCD. Turbine blades: monograph. Part 2], ОАО “Motor Sych”, Zaporozhe, 420 p.
12. Boguslaev, A.V., Olejnik, A.A., Olejnik, A.A., Pavlenko, D.V. and Subbotin, S.A. (2009), “*Progressivnye tekhnologii modelirovaniya, optimizatsii i intellektual'noj avtomatizatsii etapov zhiznennogo cikla aviacionnykh dvigatelej: monohrafiya*” [Advanced technologies for modeling, optimization and intelligent automation of the stages of the life cycle of aircraft engines: a monograph], ОАО “Motor Sych”, Zaporozh'e, 468 p.



**Відомості про авторів:**

**Масягін Валерій Іванович**

кандидат технічних наук доцент  
доцент Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-2491-0450>

**Сушак Михайло Борисович**

кандидат технічних наук старший науковий співробітник  
начальник науково-дослідної лабораторії  
Державного науково-дослідного інституту авіації  
Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-0606-5812>

**Ладик Альона Миколаївна**

курсант  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-3038-6023>

**Information about the authors:**

**Valeriy Masyagin**

Candidate of Technical Sciences Associate Professor  
Senior Lecturer of Ivan Kozhedub  
Kharkiv National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-2491-0450>

**Mykhailo Sushak**

Candidate of Technical Sciences Senior Research  
Chief of Research Laboratory  
of State Research Aviation Institute,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-0606-5812>

**Alona Ladyk**

Cadet  
of Ivan Kozhedub Kharkiv National  
Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-3038-6023>

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ,  
НАЛАЖИВАНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОТОРОГО ПРИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИИ  
ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ДИРЕКТИВНЫМИ ПРОЦЕССАМИ**

В.И. Масягин, М.Б. Сушак, А.Н. Ладик

В данной статье представлены рекомендации по обеспечению надежности комплектующих деталей, изготовление, ремонт и испытания которых должно быть освоено отечественными предприятиями за директивными технологическими процессами в ходе импортозамещения. А также проведен анализ причин возникновения характерных отказов каждого типа газотурбинного двигателя с определением слабых мест в их конструкции учитывая условия эксплуатации. Выделены важные направления для обеспечения надежности, качества и стабильности при производстве (ремонте) деталей.

**Ключевые слова:** импортозамещение, запас прочности, ремонт, надёжность, ресурс, директивные технологические процессы, ресурсные показатели, эквивалентные испытания, входной контроль, технологический запас.

**ENSURING THE RELIABILITY OF GAS-TURBINE ENGINE PARTS,  
THE ESTABLISHMENT OF MANUFACTURING OF WHICH DURING IMPORT SUBSTITUTION**

V. Masyagin, M. Sushak A. Ladyk

*In this article recommendations for reliability of component parts are presented, the manufacturing, repair and testing of which should be mastered by domestic enterprises in accordance with the policy process processes during the import substitution. Also, an analysis of the causes of the typical failure of each type of gas turbine engine with the definition of weak points in their design taking into account the operating conditions. The important directions for ensuring reliability, quality and stability during production (repair) of parts are highlighted. Today, given that most of the component parts, components that are part of the design of the gas turbine engines of the aircraft engineering of the Armed Forces of Ukraine, are developed and produced in the Russian Federation, the issue of supplying equivalent staff products from other countries or the establishment of their own domestic production has become an urgent issue. Usually, a certain part of the parts in the process of repairing aviation engines is subject to mandatory replacement. According to statistics, the share of failures in the operation of gas turbine engines due to production and technological reasons is an average of 30 %. In order to avoid the technological risks that may arise in the process of establishing the production of parts at domestic enterprises, the conditions of operation of aircraft equipment that will be restored using these parts should be taken into account. Therefore, in the article a detailed analysis of the reasons for the characteristic failures of each type of gas turbine engines with the identification of weaknesses in their design over the past 5 years, when the intensity of operation of the aviation park has increased in comparison with the previous period, has been carried out. The results presented in the article can be recommended for their application at the stages of determining the inter-repair resource of gas turbine engines in the process of restoration of aviation engineering in the installation of production components, the level of reliability of which is crucial for the engine.*

**Keywords:** import substitution, margin of safety, repairs, resource, directive technological processes, resource indicators, equivalent tests, entrance control, technological stock.