

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(84).13855

В. А. ТИТОВ, Т. Р. ГАРАНЕНКО

*Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ***КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ТИПОВИХ  
ЕЛЕМЕНТІВ ПОРОЖНИСТИХ ЛОПАТОК**

*Розглянуто еволюцію конструкції вентиляторної лопатки газотурбінного двигуна. Запропонована класифікація технологічних рішень виготовлення елементів порожнистих лопаток вентилятора газотурбінного двигуна. Розроблений класифікатор є основою для вибору конструктивно – технологічних рішень при проектуванні вентиляторних лопаток. Кожен з класів має свої різновидності форм та елементів конструкції. Розглядається найбільш перспективна по масовій ефективності порожниста лопатка вентилятора з листовим наповнювачем. Запропонована технологія виготовлення фрагменту порожнистої лопатки, основу якої складають процес зварювання під тиском і формування в режимі надпластичності.*

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, вентиляторна лопатка, широкохордова лопатка, порожниста лопатка, надпластичність, зварювання під тиском.

**Вступ.** Для створення додаткової тяги, зниження температури вихідного газу, зниження витрати палива і зменшення шуму газотурбінного двигуна великого поширення набули двох і трьохкаскадні схеми осьових компресорів. Газотурбінні двигуни з такою схемою компресорів називають двоконтурні газотурбінні двигуни. Осьовий компресор розташований попереду називають компресором низького тиску, компресор розташований за ним - високого тиску. Лопатку, яку розглядаємо, відноситься до робочих лопаток компресора низького тиску двоконтурного ГТД. Лопатки компресора наймасовіша, високонавантажена і відповідальна деталь авіаційного двигуна [1; 2; 3].

**Аналіз останніх досліджень та результатів.** Вентиляторна лопатка двоконтурного ГТД це частина вхідного направляючого апарату, яка по конструктивній ознаці відноситься до типу окремих лопаток. Їх кількість на двигуні знаходиться в діапазоні від 2 до 3,5 тисяч штук. Лопатка компресора повинна мати мінімальну масу та достатню технологічність, що допускає масове виробництво. Форма і розміри пера визначаються на підставі аеродинамічного розрахунку з урахуванням забезпечення статичної та динамічної міцності. В результаті, перо лопатки має складну просторову форму з постійним або змінним профілем поперечного перерізу по висоті [1; 3].

Лопатки вентилятора це крупногабаритні деталі. При проектуванні великогабаритних лопаток необхідно вирішити наступні проблеми.

Перша проблема полягає в тому, що через малу величину відношення діаметра до довжини лопаток важко розмістити необхідну кількість лопаток. Наступна проблема пов'язана з забезпеченням допустимих вібронпружень в лопатках. Тому для демпфірування коливань і зниження вібронпружень лопатки вентилятора з великим подовженням виконують з антивібраційними полками на одному або декількох рівнях [1; 2; 3].

Для виготовлення вентиляційних лопаток широко застосовують титанові сплави через малу питому масу. Титанові сплави чутливі до концентраторів напружень, якими є антивібраційні полки. Тому в наступному поколінні вентиля-

торних лопаток в конструкції немає антивібраційних полок, але застосовують значне розширення пера по хорді. Таке покоління вентиляторних лопаток називають широкохордові.

Широкохордові лопатки мають хороші експлуатаційні та аеродинамічні характеристики, їх подальша модернізація полягає в усуненні головного недоліку надмірної маси. Питання по зниженню маси вирішується поєднанням двох напрямків: вдосконалення конструкції лопатки та використання різних матеріалів. Внаслідок виникло наступне покоління вентиляторних лопаток – полегшені [4; 5; 6; 7].

**Постановка завдання.** Велику роль у вирішенні завдання пошуку нових методів виготовлення елементів порожнистих лопаток грає класифікація технологічних рішень. Завданням будь-якої класифікації полягає не тільки в систематизуванні існуючих форм, конструкцій але і в прогнозуванні нових процесів та елементів, які не застосовуються через відсутність нових технологічних рішень [8].

Класифікація технічних рішень поперечного перерізу лопаток виконана на основі еволюції конструкції вентиляторних лопаток.

Вентиляторна лопатка з суцільним тілом пера, має антивібраційні полки, що забезпечують її динамічну міцність. Значне зменшення маси лопатки було досягнуто при використанні широкохордних лопаток з суцільним поперечним перерізом. В наступних конструкціях збільшення ефективності по масі досягається шляхом використання порожнистих перерізів пера лопатки, як в суцільному виконання так і в складній конструкції.

Основною задачею удосконалення вентиляторних лопаток є зниження маси пера лопатки за рахунок конструктивно - технологічних рішень при збереженні експлуатаційних параметрів (властивостей статичної та динамічної міцності).

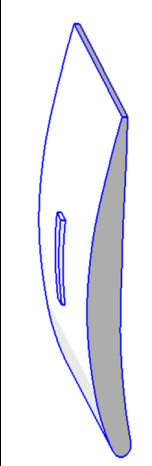
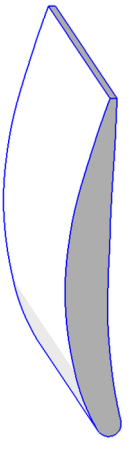
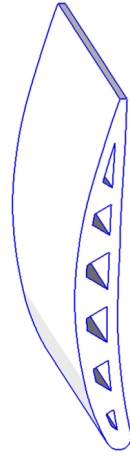
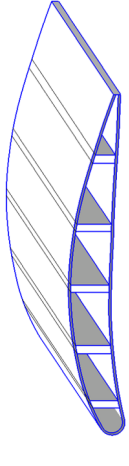
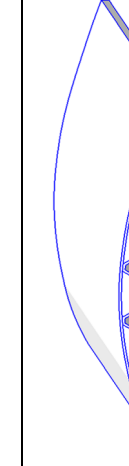
На основі узагальнення етапів еволюції конструкції вентиляторної лопатки побудована класифікація технічних рішень конструкції вентиляторної лопатки, яка представлена в табл. 1.

**Обговорення результатів.** Порожниста металева лопатка характеризується двома конструктивними елементами - «наповнювач» і «обшивка». Кількісні зміни одного з конструктивних елементів змінює форму і функції, що сприяє до придбання нових якостей. Розроблений класифікатор є основою для вибору конструктивно-технологічних рішень при проектуванні лопатки. Кожен з класів має свої різновидності форм та елементів конструкції.

Подальший розвиток класифікації може бути досягнутий при введенні таких параметрів, як закрутка пера і поперечний переріз лопатки, конфігурація і розташування елементів наповнювача, товщини обшивки, поєднання матеріалів наповнювача і обшивки. Найбільш перспективним по масовій ефективності є лопатки 4 класу – порожнисті лопатки з листовим наповнювачем. Металева порожниста лопатка в залежності від наповнювача розрізняється на гофровий або комірчастий тип. Лопатка гофрового типу може мати ребра жорсткості прямі, похилі або  $s$  – образні. Конфігурація гофрового наповнювача залежить від ширини з'єднання наповнювача з обшивкою та відстанню між зонами з'єднання. Наповнювач гофрового типу може бути з одного або двох листів.

Для порожнистих лопаток комірчастого типу варіант з'єднання наповнювача з оболонками обшивок більш складніший. Необхідні допоміжні отвори для подачі тиску між комірками. Якщо комірки не однакового розміру, необхідно реалізувати подачу різного тиску до них. У порожнистій лопатки комірчастого типу

**Таблиця 1**  
**Класифікація технічних рішень конструкції вентиляторних лопаток**

№ класу	Типове технічне рішення	Схема поперечного перерізу	Основна конструктивна ознака	Відносна ефективність зниження маси конструкції
0	Вентиляторна лопатка з антивібраційними полками		Антивібраційні полки знижують віброннапруження	110%
1	Судільна лопатка (широкохордна)		Лопатки мають велику жорсткість	100%
2	Полегшена лопатка з каналами (хаотичними, поздовжніми)		Висока відносна товщина профіля, яка обмежена робочим інструментом та технологією виготовлення	85-90%
3	Полегшена лопатка з набором лонжеронів		Використання окремих поперечних та поздовжніх силових елементів приводить до збільшення маси та трудомісткості за рахунок з'єднання.	60-70%
4	Порожниста лопатка з листовим наповнювачем		Конструкція, яка містить листовий наповнювач, є найбільш оптимальним варіантом, що забезпечує статичну та динамічну міцність	50%

площа з'єднання наповнювача з обшивкою збільшується, що приводить до збільшення міцності та надійності, але збільшується маса. Одним з основних напрямків виготовлення порожнистих лопаток є знаходження способу з'єднання обшивки і наповнювача.

На підставі цього запропонована конструкція металеві порожнистої лопатки з гофровим наповнювачем (рис. 2.). Подальше дослідження виконано на фрагменті регулярного перерізу пера лопатки.

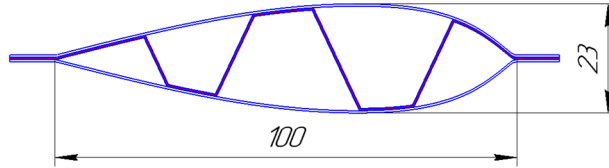


Рис. 2. Поперечний переріз фрагменту металеві порожнистої лопатки

Два листа формують корпус, один лист – наповнювач з похилими ребрами жорсткості. Такий тип порожнистої лопатки з титанових сплавів більш технологічний. Фрагмент профілю лопатки симетричний відносно горизонтальної осі, шириною пера 100мм, довжиною 250мм, висота профілю 23мм, відсутня закрутка пера.

Проведено порівняльний статичний та динамічний аналіз експлуатаційних навантажень лопатки вентилятора суцільної та порожнистої конструкції з використанням програмного комплексу ANSIS. В процесі моделювання розглядалось регулярна частина пера лопатки без кінцевих зон (хвостова частина та кінцева пера).

Показано, що радіальні та еквівалентні напруження від інерційних сил при обертанні лопаток на 10-15% нижче для порожнистих лопаток (рис. 3.).

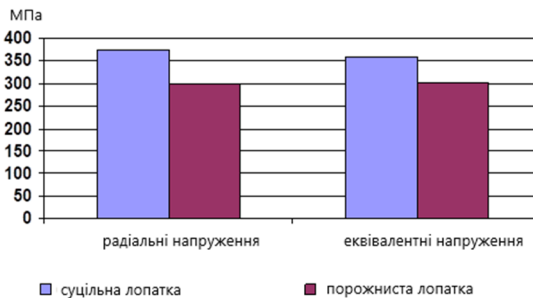


Рис. 3. Порівняльний аналіз рівня напружень вихідної і плоскої порожнистої лопаток

Рівень напружень в порожнистій лопатці нижче, ніж у вихідній. Напруження в корневому перерізі обумовлені відцентровою силою лопатки в умовах обертання з частотою ротора. Величина відцентрової сили прямо пропорційна масі лопатки. Тому напруження у вихідній лопатці (маса якої більша за масу порожнистої лопатки) будуть вище напружень порожнистої лопатки, це і показує розрахунок. Власне, перехід на порожнисту лопатку вентилятора обумовлений, зокрема, прагненням знизити рівень напружень відповідальної деталі ГТД.

Модальний аналіз показує, що у пера порожнистої плоскої моделі лопатки вентилятора частоти 3-х перших форм власних коливань значно вище, ніж у пера вихідної суцільної лопатки вентилятора (рис. 4). Порядок величин 3-х перших

частот власних коливань типовий для даної вентиляційної лопатки, величини частот низькі і забезпечують відсутність резонансу в робочому діапазоні частот обертання ротора. Різниця в величинах частот власних коливань вихідної лопатки і порожнистої обумовлена різницею в геометрії.

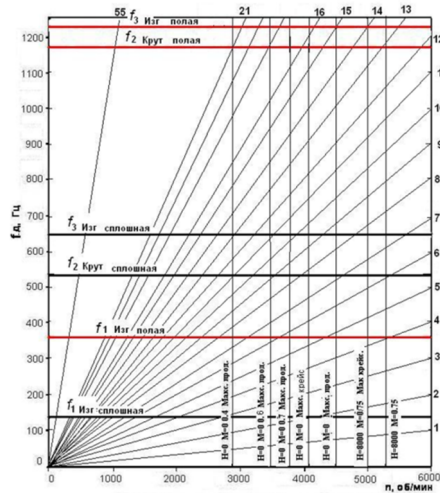


Рис. 3. Діаграма Кемпбелла (резонанс діаграма) фрагмента суцільної вентиляторної лопатки і моделі порожнистої плоскої лопатки вентилятора

Величина частот власних коливань об'єкта визначається геометрією об'єкту і матеріалом об'єкта. Конструктивно перо лопатки виконують зі збільшенням хорди по висоті пера для зниження величин резонансних частот по основним гармонікам.

На основі виконаного аналізу доведено доцільність вибраної конструкції поперечного перерізу фрагменту порожнистої лопатки. Відпрацювання технології отримання типового перерізу ґрунтується на отриманні порожнистої лопатки обмеженої довжини експериментально. Технологія виготовлення порожнистих лопаток ґрунтується на поєднанні двох процесів зварювання під тиском і формування в режимі надпластичності.

**Висновки.** Розроблено конструкторсько – технологічну класифікацію технічних рішень конструкцій лопаток вентилятора ГТД. Класифікатор дає взаємозв'язок схем поперечного перерізу лопаток з основними конструктивними ознаками. Показано, що максимальну ефективність зниження маси конструкції мають порожнисті лопатки з листовим наповнювачем (4 клас).

Встановлено, що порожнисті металеві лопатки комірчастого типу більш складніші в технологічному аспекті та мають більшу вагу, ніж лопатки гофрового типу. На підставі цього вибрана конструкція металеві порожнистої лопатки з гофровим типом.

На основі виконаного порівняльного статичного та динамічного аналізу доведено доцільність вибраної конструкції поперечного перерізу фрагменту порожнистої лопатки.

Основними проблемними складовими технологічного процесу отримання порожнистої лопатки є процеси дифузійного зварювання та використання режимів в'язкопластичного деформування.

---

**Список літератури**

1. Богуслаев В.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть 1 / В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – 420 с.
2. Машошин О.Ф. Рабочие лопатки авиационных ГТД: конструкции, прочность, эксплуатация / О.Ф. Машошин, Б.А. Чичков. – М.: МГТУ ГА, 2017. – 80 с
3. Иноземцев А.А. Газотурбинные двигатели. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Том 2. А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. – М.: Машиностроения, 2007. – 396 с.
4. Петухов А.Н. Исследования живучести сплошных и слоистых моделей применительно к лопаткам вентилятора / А.Н. Петухов // Двигатель. – 2010. - № 2. – С. 10-14.
5. Ивах А.Ф. Основы проектирования и создания рабочих лопаток из композиционного материала / А.Ф. Ивах, А.А. Рыжов, Б.К. Галимханов // Вестник УГАТУ. – 2008. – т. 11. - № 2 (29). – С. 48-54.
6. Каримбаев Т.Д. Облегченные широкохордные лопатки вентиляторов ТРДД. Особенности технологий их изготовления/ Т.Д. Каримбаев, А.А. Луппов // Конверсия в машиностроении. – 2005. - № 4-5. - С. 108-112.
7. Михалкин А.А. Рабочие лопатки вентилятора перспективных ТРДД / А.А. Михалкин // Авиационно – космическая техника и технология. – 2013. - №9. С. 97-100.
8. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью / Е.И. Исаченков. – Москва: Машиностроение, 1967. – 367 с.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2019.

**Тітов Вячеслав Андрійович** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технології виробництва літальних апаратів Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського, [vat.kpi@gmail.com](mailto:vat.kpi@gmail.com)

**Гараненко Тетяна Романівна** – асистент кафедри технології виробництва літальних апаратів Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського, [tetiana.garanenko@gmail.com](mailto:tetiana.garanenko@gmail.com)

V. A. TITOV, T. R. GARANENKO

## DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS OF TYPICAL HOLLOW BLADE ELEMENTS

The evolution of the design fan blade of a gas turbine engine is considered. The classification of technological solutions for the production of elements hollow blades of the gas turbine engine is proposed. The developed classifier is the basis for the choice of structural and technological solutions in the design of fan blades. Each class has its own varieties of shapes and structural elements. The hollow fan blade with sheet filler is considered the most promising in mass efficiency. It is established that hollow metal blade type blades are more complex in technological aspect and have more weight than corrugated blades. The design of a fragment of a hollow metal blade of a fan of a corrugated type consisting of three titanium sheets is offered. It is established that the configuration of the corrugation filler depends on the width of the joint of the filler with the cladding and the distance between the joint zones. A comparative static and dynamic analysis of the operational loads of the fan blades of solid and hollow structure was carried out using the ANSYS software. The level of stresses in the hollow blade is lower than in the output. The transition to the hollow fan blade is due, in particular, to the desire to reduce the voltage level of the responsible part of the gas turbine engine. The magnitude of the natural vibrations of an object is determined by the geometry of the object and the material of the object. The modal analysis shows that in the pen of the hollow flat model of the fan blade the frequency of the 3 first forms of natural oscillations is higher than that of the pen of the original continuous fan blade. The difference in the magnitudes of the natural oscillations of the original blade and the hollow is due to the difference in geometry. Structurally, the blade feather is performed with the increase of the chord in the height of the pen to reduce the values of resonant frequencies in the fundamental harmonics. Based on the performed analysis, the feasibility of the selected cross-sectional design of the hollow blade fragment was proved. The structure of technological process of receiving a hollow blade is proposed, which has the following main components: cutting of sheet blanks, preparation of surfaces for diffusion welding, assembly into a package and sealing on the contour, diffusion welding and forming of the blade. The main problematic components of this technology are the processes of diffusion welding and the use of viscoplasticity deformation modes.

**Key words:** turbofan engine, fan blade, wide-card blade, hollow blade, superplastic, pressure welding.

### Reference

1. Boguslaev V.A. Tehnologicheskoe obespechenie jekspluatacionnyh harakteristik detalej GTD. Lopatki kompressora i ventiljatora. Chast' 1 / V.A. Boguslaev, F.M. Muravchenko i dr. – Zaporozh'e: OAO «Motor Sich», 2003. – 420 s.
2. Mashoshin O.F. Rabochie lopatki aviacionnyh GTD: konstrukcii, prochnost', jekspluatacija / O.F. Mashoshin, B.A. Chichkov. – M.: MGTU GA, 2017. – 80 s
3. Inozemcev A.A. Gazoturbinye dvigateli. Osnovy konstruirovaniya aviacionnyh dvigatelej i jenergeticheskijh ustanovok. Tom 2. A.A. Inozemcev, M.A. Nihamkin, V.L. Sandrackij. – M.: Mashinostroenija, 2007. – 396 s.
4. Petuhov A.N. Issledovanija zhivuchesti sploshnyh i sloistyh modelej prime-nitel'no k lopatkam ventiljatora / A.N. Petuhov // Dvigatel'. – 2010. - № 2. – S. 10-14.
5. Ivah A.F. Osnovy proektirovaniya i sozdaniya rabochih lopatok iz kompozicionnogo materiala / A.F. Ivah, A.A. Ryzhov, B.K. Galimhanov // Vestnik UGATU. – 2008. – t. 11. - № 2 (29). – S. 48-54.
6. Karimbaev T.D. Oblegchennye shirokohordnye lopatki ventiljatorov TRDD. Osobennosti tehnologij ih izgotovlenija/ T.D. Karimbaev, A.A. Luppov // Konversija v mashinostroenii. – 2005. - № 4-5. - S. 108-112.
7. Mihalkin A.A. Rabochie lopatki ventiljatora perspektivnyh TRDD / A.A. Mihalkin // Aviacionno – kosmicheskaja tehnika i tehnologija. – 2013. - №9. S. 97-100.
8. Isachenkov E.I. Shtampovka rezinoj i zhidkost'ju / E.I. Isachenkov. – Moskva: Mashinostroenie, 1967. – 367 s.