

УДК 621.452.3.038-226-752.2

doi: 10.32620/aktt.2019.7.15

Р. Ю. ШАКАЛО¹, Р. П. ПРИДОРОЖНЫЙ¹, Ю. В. ЯКУШЕВ¹,
В. М. МЕРКУЛОВ¹, А. П. ЗИНЬКОВСКИЙ²

¹ ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

² Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОПАРНО БАНДАЖИРОВАННЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН

Охлаждаемые рабочие лопатки турбины являются деталями, определяющими надежность и ресурс газотурбинного двигателя. Как известно большинство случаев выхода из строя двигателя связано именно с разрушением рабочих лопаток турбины. Рабочие лопатки турбины в процессе работы испытывают высокие термические напряжения, напряжения от центробежных и газовых сил, а также динамические напряжения. В данной работе приведены методы обеспечения приемлемого уровня динамических напряжений в рабочих лопатках турбины. Более детально рассмотрен один из наиболее эффективных методов – попарное бандажирование охлаждаемых рабочих лопаток турбины. Эффективность демпфирования таких рабочих лопаток зависит от гарантированного соприкосновения контактных поверхностей полок хвостовиков и бандажных полок и от оптимальности бандажной связи. В качестве объекта исследования выбраны охлаждаемые попарно бандажированные рабочие лопатки турбины с двигателя, на котором было несколько случаев разрушения рабочих лопаток турбины. Для оценки оптимальности бандажной связи исследуемых рабочих лопаток разработанная схема расчета силы, действующей на контактные поверхности бандажных полок. По разработанной схеме выполнены расчеты сил, действующих на контактные поверхности бандажных полок, как исследуемых рабочих лопаток, так и для подобных охлаждаемых попарно бандажированных рабочих лопаток турбин, разработки ГП «Ивченко-Прогресс». После расчета силы, действующей на контактную поверхность бандажной полки, проведен анализ зависимости величины силы от геометрических параметров профиля пера. По полученным данным построен график зависимости напряжения в пере от относительной силы, действующей на контактную поверхность бандажной полки. Анализ графика зависимости позволил сделать вывод, что существует оптимальная сила, при которой динамические напряжения будут приемлемыми. Однако ввиду того, что представлена небольшая выборка охлаждаемых попарно бандажированных рабочих лопаток необходимо, продолжить работы по определению критериев оптимальности бандажной связи и по уточнению полученной зависимости.

Ключевые слова: рабочая лопатка; демпфирование колебаний; попарное бандажирование.

Введение

Рабочие лопатки турбины являются наиболее нагруженными деталями газотурбинного двигателя.

Повышение надежности лопаток достигается комплексом мероприятий: это точное определение собственных частот высших форм колебаний, точная отстройка их от резонанса, применение связей между лопатками (в том числе демпферных), ограничение допускаемых статических напряжений, а также снижение уровня аэродинамических возмущающих сил.

В настоящей работе рассматривается способ снижения динамических напряжений за счет механического демпфирования рабочих лопаток турбин.

Демпфирование колебаний лопаток ограничивает динамические напряжения, возникающие в конструкции, и при определенных условиях дает возможность работать и в условиях резонанса.

Существует несколько основных методов демпфирования колебаний: подполочные демпферы сухого трения, специальные покрытия, воздушные демпферы, специальные вставки, бандажирование рабочих лопаток. Одним из эффективных способов снижения динамических напряжений является полочное бандажирование. Среди существующих схем бандажирования лопаток особый интерес представляют так называемое попарное бандажирование, когда имеет место взаимодействие по контактным поверхностям бандажных полок и по полкам хвостовиков пар лопаток венца. Эффективность демпфирования таких рабочих лопаток зависит от гарантированного соприкосновения контактных поверхностей полок хвостовиков и бандажных полок, а также от оптимальности бандажной связи. При нарушении контакта, по бандажной полке или по полке хвостовика, напряжение в пере лопаток резко возрастает, что может привести к разрушению лопа-

ток турбины. Также к повышению напряжений в пере может приводить повышенный натяг по контактным поверхностям бандажных полок, и наличие контакта между соседними парами лопаток.

Постановка задачи

При испытаниях двигателя на ГП «Ивченко-Прогресс» было несколько случаев разрушения охлаждаемых попарно бандажированных рабочих лопаток турбины. На рисунках 1, 2 представлены примеры разрушения рабочих лопаток турбины.



Рис. 1. Разрушение рабочих лопаток

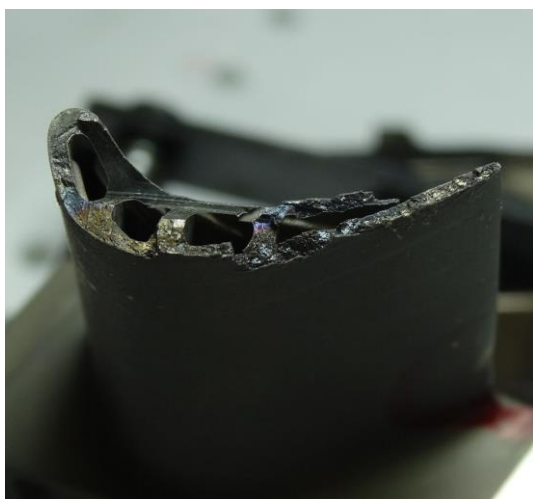


Рис. 2. Излом рабочей лопатки

Одними из предполагаемых причин разрушения считались:

- нарушение контакта по полкам хвостовиков и/или по бандажным полкам и как следствие нарушение демпфирования;
- не оптимальная связь по контактным поверхностям бандажных полок, и как следствие высокие напряжения в пере.

В ходе исследования разрушенных рабочих лопаток турбины установлено, что нарушения контакта по полкам не было. Соприкосновение по плоскостям елочного замка и по контактным поверхностям бандажных полок не нарушено. Геометрических отклонений рабочих лопаток от требований чертежа также не выявлено.

Для определения оптимальной связи по бандажным полкам необходимо проведение тензометрирования с различными условиями сопряжения по бандажным полкам. Провести тензометрирование на исследуемом двигателе на данный момент не представляется возможным.

Вследствие чего возникла необходимость установить критерий оптимальности бандажной связи исследуемых рабочих лопаток аналитическим методом.

Решение задачи

В ходе решения поставленной задачи было предложено оценить силу, действующую на контактную поверхность бандажной полки. Силу определить, как для исследуемых, так и для подобных охлаждаемых попарно бандажированных рабочих лопаток, разработки ГП «Ивченко-Прогресс», которые прошли испытания по тензометрированию и показали приемлемый уровень напряжений.

Для обеспечения контакта по бандажной полке ось пера одной лопатки из пары (как правило, левой) наклоняют для создания силы притяжения.

В ходе выполнения работы разработана схема (рис. 3) расчета силы действующей на контактную поверхность бандажной полки, возникающей в результате наклона оси пера одной из парных лопаток.

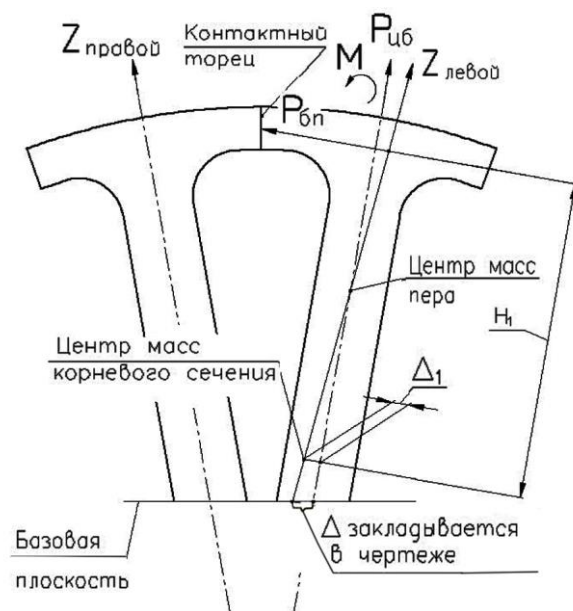


Рис. 3. Схема расчета силы, действующей на бандажную полку

Представлены формулы расчета силы действующей на бандажную полку.

$$M = R_{цб} \cdot \Delta_1, \quad (1)$$

где M – момент, возникающий в результате наклона оси лопатки;

$R_{цб}$ – центробежная сила, действующая на лопатку;

Δ_1 – плечо в корневом сечении пера лопатки, вычисляется по математической модели лопатки, построенной в системе Unigraphics;

$$R_{БП} = \frac{M}{H_1}, \quad (2)$$

$R_{БП}$ – сила, действующая на контактную поверхность бандажной полки;

H_1 – расстояние от корневого сечения пера лопатки, до точки приложения силы;

По разработанной схеме и по формуле (2) выполнены расчеты сил действующих на контактные поверхности бандажных полок рабочих лопаток турбины, разработанных на ГП «Ивченко-Прогресс». Для выполнения расчетов использовались 3-D модели рабочих лопаток, построенные в системе Unigraphics.

Для приведения результатов расчета к относительной величине силы, рассчитанные по формуле (2) предложено отнести к таким параметрам лопаток: S_{max} среднего сечения и к хорде пера в среднем сечении. Результаты представлены в таблице 1. Также в таблице 1 приведены результаты тензометрирования рабочих лопаток.

Таблица 1
Вибрационные напряжения и силы, действующие на бандажную полку в рабочих лопатках ТВД

№	Двигатель	$R_{БП}$, кг	$R_{БП}/S_{max}/L$	σV_{max} , кгс/мм ²
1	АИ-322	18,32	0,16	-
2	Д-436	17,34	0,11	2,6
3	Д-36	19,19	0,14	2,7
4	Д-18Т	17,27	0,08	2,9

По полученным данным построен график зависимости напряжения в пере от относительной силы, действующей на контактную поверхность бандажной полки. График приведен на рисунке 4.

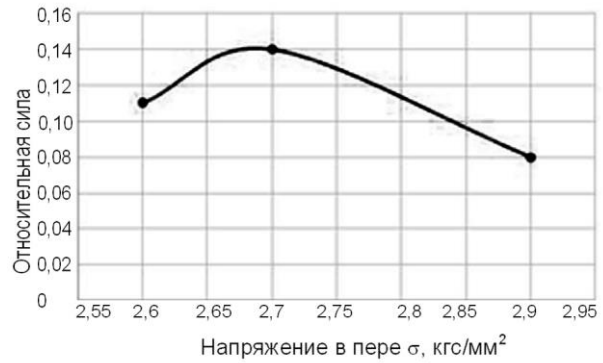


Рис.4. Зависимость напряжений в пере от относительной силы

Заключение

Сила действующая на контактную поверхность бандажной полки исследуемых рабочих лопаток соизмерима с силами действующими на бандажные полки подобных охлаждаемых попарно бандажированных рабочих лопаток, разработки ГП «Ивченко-Прогресс».

Сила, действующая на контактную поверхность бандажной полки, зависит от угла наклона оси лопатки. Решая обратную задачу при проектировании попарно бандажированных лопаток, возможно, определить угол наклона оси лопатки для создания необходимой силы, действующей на бандажную полку и добиться приемлемого уровня напряжения в пере.

Анализ графика зависимости позволил сделать вывод, что существует оптимальная сила, при которой динамические напряжения будут приемлемыми. Однако ввиду того, что представлена небольшая выборка охлаждаемых попарно бандажированных рабочих лопаток турбины необходимо, продолжить работы по определению критериев оптимальности бандажной связи и по уточнению полученной зависимости.

Литература

1. Саженов, Н. А. Расчетно-экспериментальное моделирование демпфирования рабочих лопаток турбомашин демпферами сухого трения [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Саженов Николай Алексеевич ; Пермский национальный исследовательский политехнический ун-т, 2017. – 160 с.
2. Воробьев, Ю. С. Колебания лопаточного аппарата турбомашин [Текст] / Ю. С. Воробьев. - М. : Наукова думка, 1988. - 224 с.
3. Троценко, В. Т. Несущая способность рабочих лопаток ГТД при вибрационных нагрузках [Текст] / В. Т. Троценко, В. В. Матвеев, Б. А. Гряз-

нов. – М. : Наукова думка, 1981. – 316 с.

4. Матвеев, В. В. Демпфирование колебаний деформируемых тел [Текст] / В. В. Матвеев. – М. : Наукова думка, 1985. – 264 с.

References

1. Sazhenkov, N. A. *Raschetno-eksperimental'noe modelirovanie dempfirovaniya rabochikh lopatok turbomashin dempferami sukhogo treniya*. Dis. kand. tekhn. nauk. [Computational and experimental modeling of the damping of turbine blades of working turbines with dry snubbers]. Perm. national researches Polytech-

nic Univ., 2017. 160 p.

2. Vorob'ev, Yu. S. *Kolebaniya lopatochnogo apparata turbomashin* [Vibrations of the turbomachine blade]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1988. 224 p.

3. Troshchenko, V. T. *Nesushchaya sposobnost' rabochikh lopatok GTD pri vibratsionnykh nagruzheniyakh* [Bearing capacity of GTE working blades under vibration loads]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1981. 316 p.

4. Matveev, V. V. *Dempfirovaniye kolebanii deformiruemyykh tel* [Damping vibrations of deformable bodies]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1985. 264 p.

Поступила в редакцию 5.06.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ДЕМПФІРУВАННЯ КОЛИВАНЬ ОХОЛОДЖУВАНИХ ПОПАРНО БАНДАЖОВАНИХ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБІН

*Р. Ю. Шакало, Р. П. Придорожний, Ю. В. Якушев,
В. М. Меркулов, А. П. Зінковський*

Охолоджувальні робочі лопатки турбіни є деталями, що визначають надійність і ресурс газотурбінного двигуна. Як відомо більшість випадків виходу з ладу двигуна пов'язано саме з руйнуванням робочих лопаток турбіни. Робочі лопатки турбіни в процесі роботи відчувають високі термічні напруги, напруги від відцентрових і газових сил, а також динамічні напруги. У даній роботі приведені методи забезпечення прийнятної рівня динамічних напружень в робочих лопатках турбіни. Більш детально розглянуто один з найбільш ефективних методів - попарне бандажування охолоджуваних робочих лопаток турбіни. Ефективність демпфювання таких робочих лопаток залежить від гарантованого зіткнення контактних поверхонь полиць хвостовиків і бандажних полиць і від оптимальності бандажного зв'язку. Як об'єкт дослідження обрані охолоджені попарно бандажовані робочі лопатки турбіни з двигуна, на якому було кілька випадків руйнування робочих лопаток турбіни. Для оцінки оптимальності бандажного зв'язку досліджуваних робочих лопаток розроблена схема розрахунку сили, що діє на контактні поверхні бандажних полиць. За розробленою схемою виконані розрахунки сил, що діють на контактні поверхні бандажних полиць, як досліджуваних робочих лопаток, так і для подібних охолоджуваних попарно бандажованих робочих лопаток турбін, розробки ДП «Івченко-Прогрес». Після розрахунку сили, що діє на контактну поверхню бандажної полиці, проведено аналіз залежності значення сили від геометричних параметрів профілю пера. За отриманими даними побудовано графік залежності напруги у пері від відносної сили, що діє на контактну поверхню бандажної полиці. Аналіз графіку залежності дозволив зробити висновок, що існує оптимальна сила, при якій динамічні напруги будуть прийнятними. Однак з огляду на те, що представлена невелика вибірка охолоджуваних попарно бандажованих робочих лопаток необхідно, продовжити роботи з визначення критеріїв оптимальності бандажного зв'язку і по уточненню отриманої залежності.

Ключові слова: робоча лопатка; демпфювання коливань; попарне бандажування.

DAMPING OF VIBRATIONS OF PAIRWISE SHROUDED COOLED TURBINE BLADES

*R. Yu. Shakalo, R. P. Pridorozhnyy, Yu. V. Yakushev,
V. M. Merkulov, A. P. Zin'kovskii*

The cooled turbine blades are the parts that determine the reliability and service life of a gas turbine engine. As is known, most cases of engine failure are related to the destruction of turbine blades. Turbine blades during operation experience high thermal stresses, the stresses from centrifugal and gas forces, as well as dynamic stresses. This paper presents methods for ensuring an acceptable level of dynamic stresses in turbine blades. One of the most effective methods is considered in more detail - pairwise shrouded cooled turbine blades. The effectiveness of the damping of such working blades depends on the guaranteed contact of the contact surfaces of the flanges of the shanks and banding shelves and the optimality of the shroud connection. As the object of the study, we chose pairwise shrouded turbine blades from the engine, on which there were several cases of destruction of the turbine blades. To assess the optimality of the bandage connection of the working blades under study, a scheme has been developed for calculating the force acting on the contact surfaces of the banding shelves. According to the developed scheme, calculations were made of the forces acting on the contact surfaces of the retaining shelves, both of the investigated

working blades, and similarly pairwise shrouded cooled turbine blades, developed by SE «Ivchenko-Progress». After calculating the force acting on the contact surface of the retaining shelf, the ratio of the received force to the parameters of the feather profile, such as chord and CMAX, is calculated. According to the data obtained, a graph of the dependence of the voltage in the blade on the relative force acting on the contact surface of the retaining shelf was plotted. The analysis of the obtained graph made it possible to conclude that there is an optimal force at which dynamic stresses will be acceptable. However, since a small sample of pairwise shrouded cooled turbine blades is presented, it is necessary to continue the work on determining the criteria for optimality of the shroud linkage and on clarifying the resulting relationship.

Keywords: working blade; damping of vibrations; pairwise shrouded cooled turbine blades.

Шакало Руслан Юрьевич – инженер-конструктор 1 категории ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Придорожный Роман Петрович – канд. техн. наук, ведущий инженер ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Якушев Юрий Владимирович – Начальник отдела турбин ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Меркулов Вячеслав Михайлович – канд. техн. наук, Главный конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Зиньковский Анатолий Павлович – д-р техн. наук, проф., заместитель директора Института по научной работе, Киев, Украина.

Shakalo Ruslan Yurevich – design engineer of the 1st category of SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: ShakaloRYu@zmdb.ua, ORCID Author ID: 0000-0003-4324-9191

Pridorozhnyy Roman Petrovich – Cand. tech. Sci., leading engineer of SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: PridorozhnyyRP@zmdb.ua, ORCID Author ID: 0000-0003-3957-2375

Yakushev Yuri Vladimirovich – Head of the Turbine Department of SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: YakushevYuV@zmdb.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-7393-9735

Merkulov Vyacheslav Mikhailovich – Cand. tech. Sci, Chief Designer of SE "Ivchenko-Progress" Zaporozhye, Ukraine, e-mail: MerkulovVM@zmdb.ua, ORCID Author ID: 0000-0001-9062-1297

Zin'kovskii Anatoly Pavlovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director of the Institute for Scientific Work, Kiev, Ukraine, e-mail: Zinkovskii@ipp.kiev.ua, ORCID Author ID: 0000-0003-0803-7054, Scopus Author ID: 14066898800