

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-4-60-72

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРА СОБСТВЕННЫХ ФОРМ И ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО АВИАДВИГАТЕЛЯ

М.Г. БЕЛОУСОВ¹, О.Ф. МАШОШИН²

¹АО «Гражданские самолеты Сухого», г. Москва, Россия

²Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

В статье представлены результаты проведенных исследований колебаний лопаток, жестко закрепленных на диске компрессора высокого давления вспомогательной силовой установки (ВСУ). Задача исследования поставлена ввиду разрушения каскада лопаток, что привело к выводу ВСУ из строя. Назначенный ресурс ВСУ не был обеспечен. С разрушением лопаток компрессоров сталкивались с момента появления газотурбинных двигателей, однако не всегда было возможно всесторонне исследовать эту проблему и полностью предотвратить разрушения лопаток компрессоров. В результате анализа статистики усталостных разрушений лопаток выявлено, что все лопатки независимо от их размера, материала изготовления разрушаются в определенных зонах на спинке, кромках, торце. Относительные координаты расположения трещин примерно одинаковы. Это свидетельствует о наличии общих закономерностей динамического нагружения лопаток и возникающей в них напряженности при резонансных колебаниях. Причем наличие эксплуатационных повреждений на лопатках не влияет на эти закономерности. Однако к лопаткам, представленным в настоящем исследовании (широкохордным, с переменной толщиной от входной к выходной кромке), данные закономерности не в полной мере применимы, в отличие от лопаток классической стандартной формы, но имеют некоторое сходство. Исследование спектра собственных форм и частот колебаний лопатки является первым этапом в решении проблемы разрушений лопаток. Каждая деталь имеет бесконечное количество частотных характеристик, образующих спектр. Каждой частоте собственных колебаний соответствует своя форма колебаний. Форма колебаний определяется картиной знакопеременных смещений или прогибов, а также положением узловых линий. В узловых линиях перемещения бесконечно малы и считаются нулевыми. По разные стороны узловых линий смещения колеблющихся участков находятся в противофазе. Совокупность форм колебаний детали образует спектр форм [1]. В представленном исследовании использовался песочный метод определения спектра частот колебаний. Эксперимент позволит определить зоны возникновения дефектов с последующим развитием усталостных трещин и реальную динамическую нагруженность лопаток данной конструкции.

Ключевые слова: компрессор высокого давления ВСУ, авиадвигатель, лопатки компрессора, усталостные разрушения, форма колебаний, спектры колебаний, трещины, собственные колебания.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени достигнуты значительные успехи в создании надежных газотурбинных авиадвигателей. Однако опыт эксплуатации показывает, что полностью исключить усталостные разрушения лопаток компрессоров любого типа двигателя не удается всем без исключения производителям отечественной и зарубежной авиационной техники. Разрушение лопаток может возникнуть при различных условиях работы двигателя, например, у ВСУ режимы работы меняются только на запуске и могут отличаться от номинального режима, если есть какие-либо незначительные неисправности, к примеру, забитые охлаждающие отверстия камеры сгорания. В компрессоре на лопатки действуют переменные газодинамические силы, ввиду неравномерности потока газа в проточной части двигателя. Эти силы изменяются в определенный период времени, равный одному обороту двигателя. Высокие динамические колебания лопаток создают в них напряжения, которые вызывают усталостные явления в материале [2]. Вслед-

ствие этого с течением времени в различных местах лопаток появляются трещины, приводящие к их разрушению, однако период времени разрушения лопатки может быть очень коротким, что приводит к досрочному съему двигателя. Эксплуатационная надежность транспортного средства, оснащенного газотурбинной установкой, в том числе и ВСУ, во многом определяется надежностью, прочностью, долговечностью лопаток турбокомпрессоров [3, 14].

В процессе эксплуатации ВСУ выявлено разрушение, которое до недавнего времени не встречалось и привело к выводу двигателя из эксплуатации без возможности выполнения ремонта. Данное разрушение выявлено первично в эксплуатации, до этого разрушений лопаток компрессора ВСУ не встречалось. Для объяснения причин разрушения встала первичная задача – исследовать спектр собственных форм и частот колебаний лопатки. В эксплуатации в настоящее время часто наблюдаются поломки по тем формам колебаний, частотная отстройка от которых должна быть выполнена в обязательном порядке на заводе-изготовителе разработчиком авиадвигателя.

Ввиду отсутствия данных по аналогичным конструкциям лопаток в других литературных источниках, была использована известная методика В.П. Иванова, позволяющая осуществить поиск собственных форм и частот в заданном диапазоне и произвести их анализ и классификацию [1]. Эксперимент проводился в лабораторных условиях с использованием установки, показанной на рис. 1, включающей в себя:

- генератор низкой частоты ГНЧ;
- цифровой частотомер ЧЗ-33;
- осциллограф;
- возбудитель колебаний, вибраторы лопатки пьезоэлектрического или индукционного типа (рис. 2).

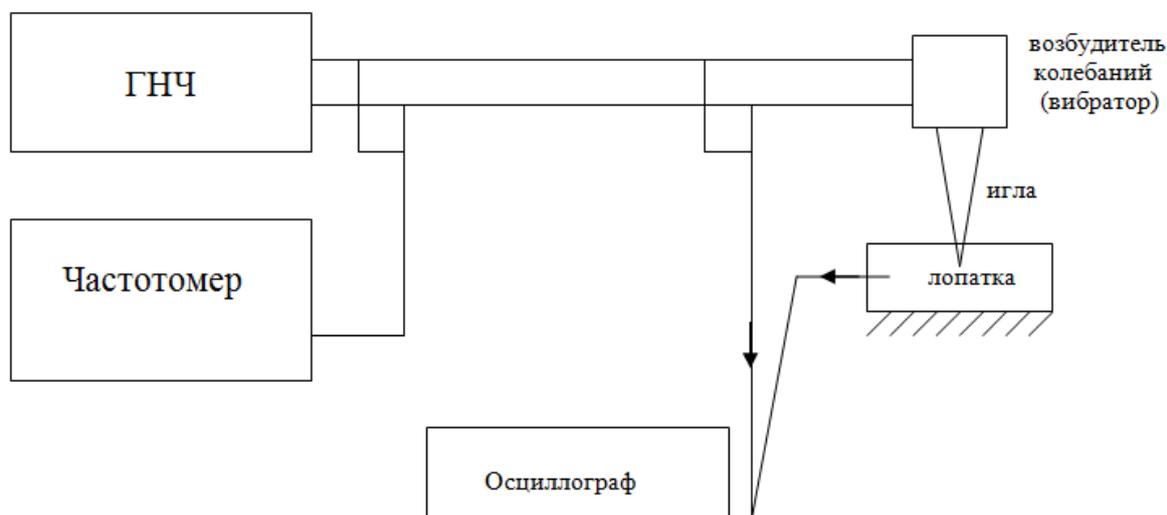


Рис. 1. Блок-схема установки
Fig. 1. Diagram of unit

Для точности измерения частот собственных форм колебаний лопатки потребовалось вырезать из диска сектор с тремя лопатками, так как эксперимент невозможно было провести ни на двигателе в собранном состоянии, ни в случае, если выполнить демонтаж диска с лопатками отдельно. Полноту и достоверность данных результатов контроля предполагается возможным определить следующим способом: закрепив часть рабочего колеса, при этом лопатки остаются открытыми для изучения процесса их колебаний. Трудность проведения эксперимента также заключалась в том, что лопатки закреплены на диске без замков, конструкция представ-



Рис. 2. Пьезоэлектрический вибратор
Fig. 2. The piezoelectric vibrator



Рис. 3. Лопатки для испытаний
Fig. 3. Blades for test

ляет собой цельную литую деталь. Чтобы провести эксперимент, потребовалось подготовить специальную оснастку для закрепления сектора, вырезанного из диска с лопатками, с учетом того, что сектор должен оставаться неподвижным и чтобы не возникало сторонних внешних воздействий, которые могли бы повлиять на изменение спектра собственных форм и частот колебаний лопатки. Зажимные элементы должны быть достаточно жесткими с равномерно распределенным усилием зажима сектора с лопатками. Следовало учитывать, что масса зажимного приспособления должна быть на определенный порядок выше, чем контролируемый вырезанный сектор [1], что обеспечит стабильные показания при проведении многократных измерений. В качестве зажимного приспособления использовалось устройство в виде специальных тисков с возможностью поворота закрепленных лопаток в двух плоскостях (рис. 3). Рисунки узловых линий проявляются с помощью песочного метода. Полученные фигуры фотографировались. Для удобства и повышения точности оценки частот колебаний лопатки одну из лопаток отполировали со стороны корытца.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ФОРМ И ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТКИ

Первоначально определялись резонансные частоты в диапазоне 770–21000 Гц. Частотные кривые позволяют оценить полноту спектра в указанном диапазоне и исключить пропуски собственных частот. При проведении исследования планировалось, что исследуемым лопаткам будут присущи закономерности колебаний, по крайней мере для первого десятка форм, представляющих интерес для практики. Практический интерес представляет та часть спектра собственных частот и соответствующих форм колебаний лопатки, которая лежит в пределах 10–15 кГц. Рисунки узловых линий и соответствующие частоты по основным видам колебаний лопатки представлены в табл. 1, где m – число узловых линий, проходящих через оси симметрии; n_1 – изгибная форма, n_2 – крутильная форма, n_3 – пластинчатая форма.

Спектр собственных форм и частот колебаний таких лопаток предположительно состоит из двух спектров, наложенных друг на друга, включая «смешанные» формы. На это указывает характер рисунков узловых линий и плотный спектр частот (1740–1760, 16250, 16400 Гц). В результате проведения исследования получены следующие рисунки узловых линий, представленные в табл. 2 с указанием частот спектров. Ввиду слишком узкого диапазона наложения частот, пропущенные ячейки в табл. 2 не заполнены. Собственные частоты колебаний лопатки расположены достаточно близко для данного вида лопатки [8].

Таблица 1
Table 1

Предполагаемые рисунки узловых линий, которые должны были проявиться при проведении эксперимента
The supposed patterns of nodal lines that were to appear during the experiment

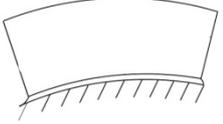
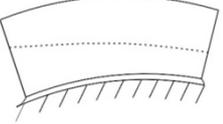
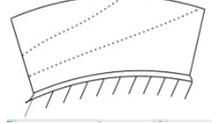
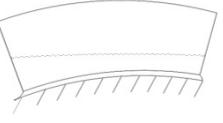
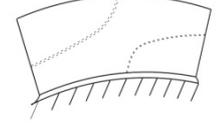
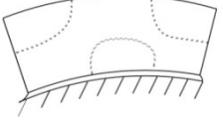
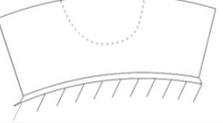
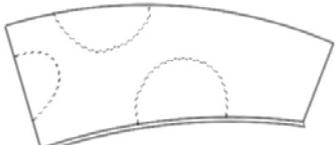
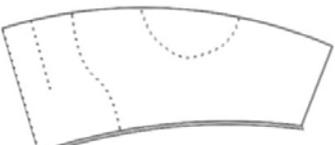
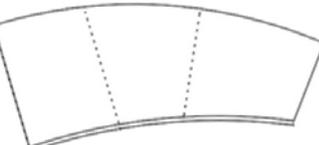
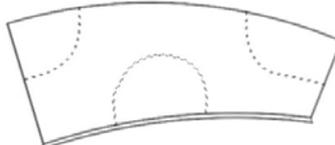
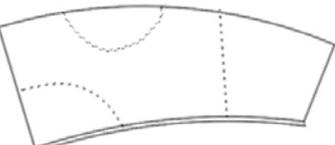
$n \backslash m$	1	2	3
1			
2			
3			

Таблица 2
Table 2

Полученные рисунки узловых линий и спектры собственных форм и частот колебаний лопатки
The resulting drawings of natural form and vibration frequencies of the blade

 1740–1760 Гц	–	–
 2360 Гц	 16250 Гц	 15500 Гц
 3700 Гц	 16400 Гц	 10800 Гц
 5500 Гц	–	–

Классические рисунки узловых линий для обычных лопаток проявляются и на испытуемой лопатке, если развернуть классическую лопатку на 90° относительно оси крепления лопатки, что отмечено штриховкой на рис. 4.

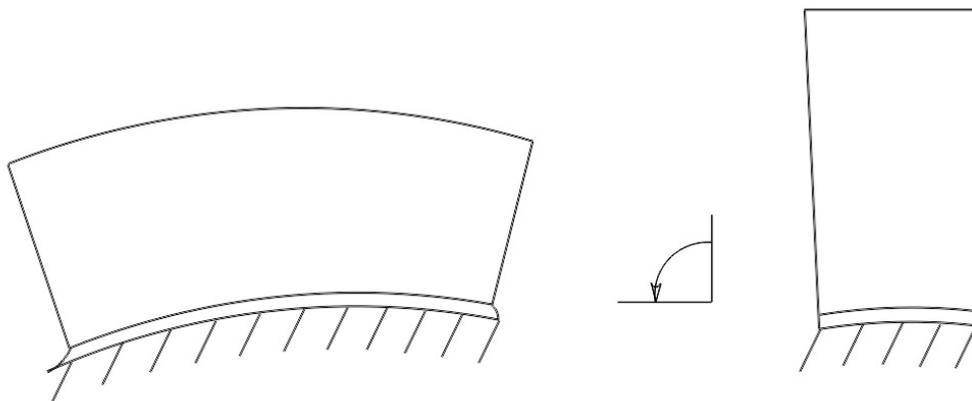


Рис. 4. Взаимосвязь получения узловых линий при повороте лопатки на 90°
Fig. 4. The relationship between receiving the nodal lines at 90° blade rotation

Если сравнить табл. 1 с предполагаемыми рисунками узловых линий и табл. 2 с полученными рисунками узловых линий и спектром собственных форм и частот лопатки, следуют выводы о том, что принятая к настоящему времени классификация форм колебаний лопаток применима только к классическим лопаткам (эскиз лопатки на рис. 4 справа). Физическая сущность процессов, происходящих при таких колебаниях для исследуемой лопатки недостаточно исследована к настоящему времени. Расчеты не позволяют объяснить, и тем более прогнозировать, разрушения лопаток, наблюдающихся в эксплуатации [11, 12].

Классическое разделение колебаний лопаток на изгибные, крутильные, изгибно-крутильные, пластинчатые и сложные формы вносит лишь некоторый порядок. Много зависит от принимаемой точки зрения на характер колебаний и визуализации наблюдений. Для наглядности схематично представлена исследуемая лопатка в виде спектра собственных форм и частот колебаний по первой крутильной форме (рис. 5, *a*) и аналогичный спектр собственных форм и частот для классической лопатки по второй изгибной форме (рис. 5, *b*). Полученные узловые линии исследуемой лопатки не совпадают с предполагаемыми линиями в табл. 1, но взаимосвязаны с узловыми линиями для классических лопаток, при этом разрушения могут проявиться также и в другом месте. Для классической лопатки при испытании колебаний на изгибной форме произойдет (при определенных условиях) отрыв пера, а для исследуемой лопатки образование трещины начнется в середине торца лопатки, что характерно для крутильной или пластинчатой формы колебаний [13].

Если представить, что лопатка – это плоская пластина, то способы крепления ее концов могут быть следующие: односторонняя заделка, двухсторонняя заделка, шарнирное крепление и др. В данном случае лопатка жестко закреплена на диске, но для проведения исследования диск обрезают и получена односторонняя заделка лопатки (отмечено параллельными линиями штриховки на каждом из эскизов лопаток).

Любая из форм колебаний лопатки имеет определенную частоту собственных колебаний, которые зависят от некоторых различных параметров лопатки. Геометрическое место точек, остающихся неподвижными при гармонических колебаниях, называется узловой линией. Узловые линии разделяют поверхность на области таким образом, что в каждый определенный момент времени амплитуды вибрационных перемещений имеют противоположные знаки. Частотам более высоким соответствуют формы колебаний с большим количеством узловых линий [1].

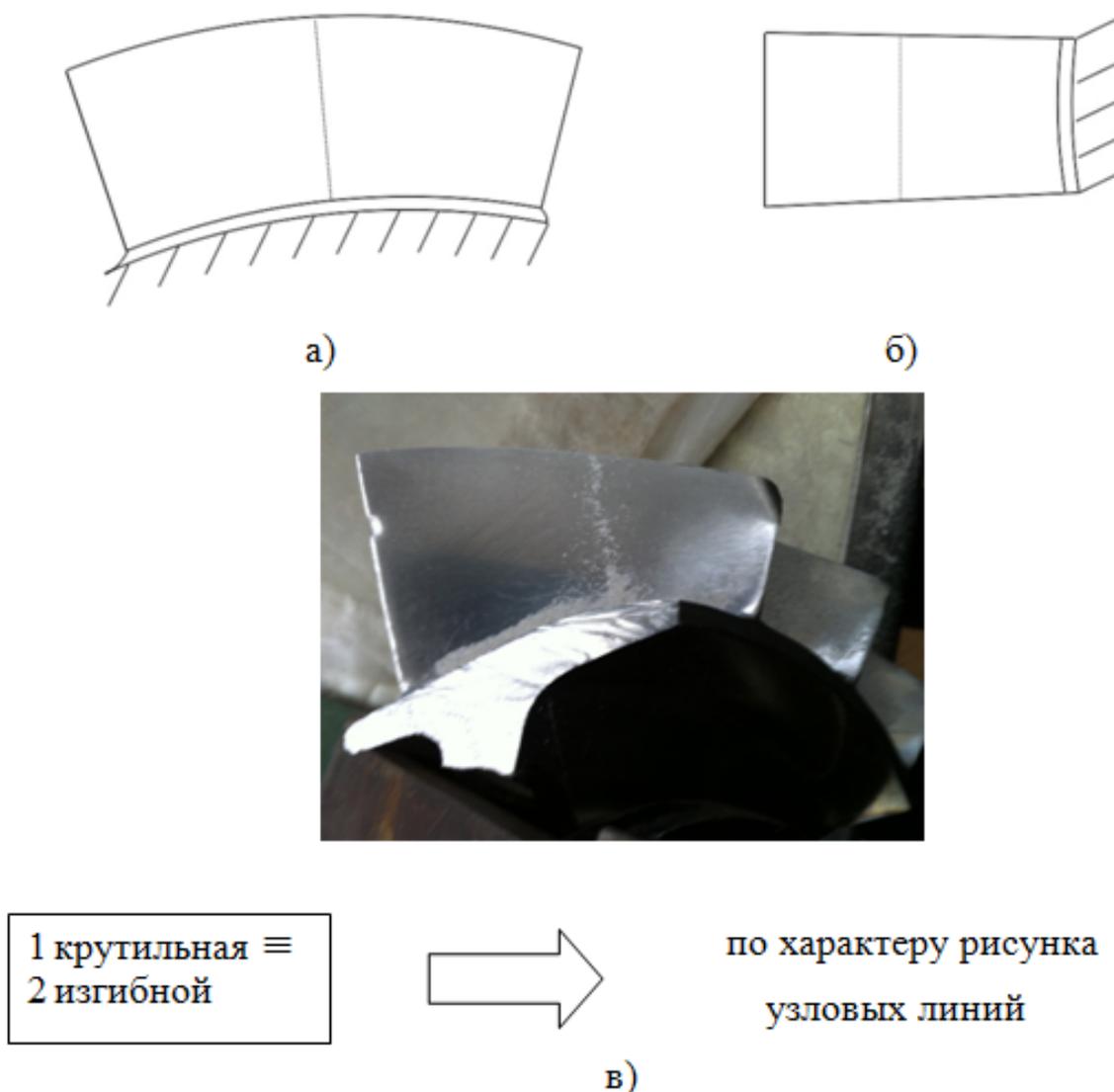


Рис. 5. Узловые линии колебаний лопатки:

a – по 1-й крутильной форме для исследуемой лопатки; *б* – по 2-й изгибной форме для классической лопатки; *в* – фото узловых линий исследуемой лопатки и сопоставление вида узловых линий исследуемой лопатки с классической лопаткой – 1-я крутильная форма колебаний тождественно равна 2-й изгибной форме колебаний по характеру рисунка узловых линий на лопатке

Fig. 5. A nodal line vibration blade:

a – 1st torsion form of the investigation blade; *b* – 2nd bending form for classic blade; *v* – photo of nodal lines of investigation blade and constable view of slow lines of investigation blade with classic blade – 1st torsion form is identical to 2nd bending form by the nature of the pattern of nodal lines on the blade

Если изменить геометрическое местоположение неподвижных точек узловых линий, т. е. развернуть их вместе с лопаткой на 90 градусов относительно классического спектра собственных форм и частот колебаний лопаток, при условии, что заделка лопатки не поменялась, то необходимо менять классификацию формы колебаний, а следовательно, и менять представление о напряженности пера и месте возможного усталостного разрушения лопаток (широкохордных, переменной толщины) [12].

Расположение заделки лопатки влияет лишь на некоторое положение узловых линий в поле напряжений, но в целом они должны иметь сходный характер, если сравнить со спектром колебаний классической лопатки (рис. 5–8).

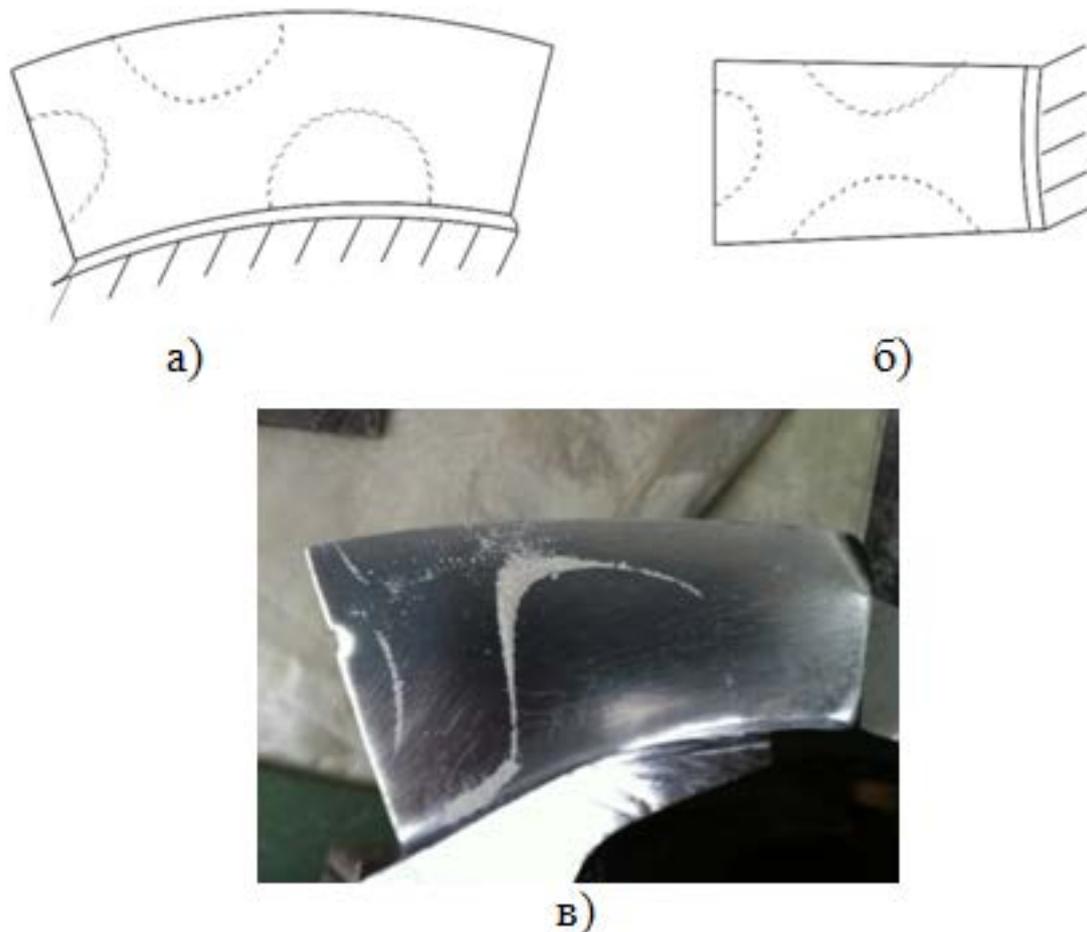
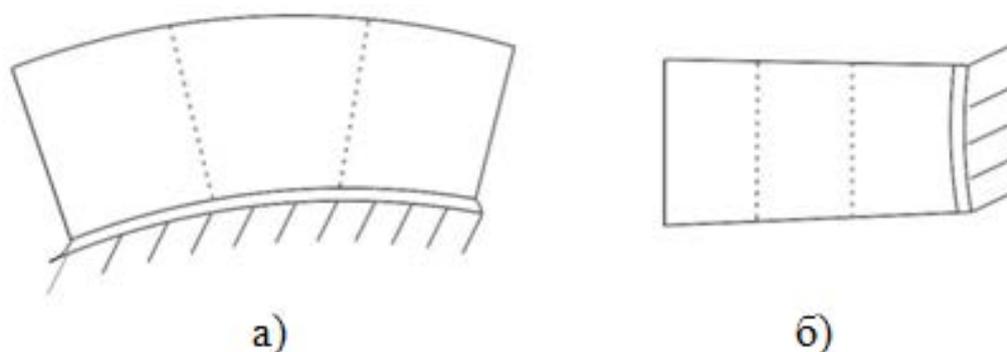
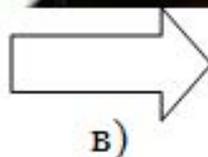


Рис. 6. Узловые линии колебаний лопатки:
a – по сложной форме для исследуемой лопатки;
б – по 3-й пластинчатой форме для классической лопатки;
в – фото узловых линий на исследуемой лопатке
Fig. 6. A nodal line of vibration of the blade:
a – complex form of the investigation blade;
б – third lamellar form for classic blade;
в – photo of nodal lines of investigation blade



1 пластинчатая
≡ 3 изгибная



по рисунку
узловых линий

Рис. 7. Узловые линии колебаний лопатки:
a – по 1-й пластинчатой форме для исследуемой лопатки;
б – по 3-й изгибной форме для классической лопатки;
в – фото узловых линий на исследуемой лопатке и сопоставление вида
 узловых линий исследуемой лопатки
 с классической лопаткой – 1-я пластинчатая форма колебаний
 тождественно равна 3-й изгибной форме колебаний

Fig. 7. A nodal line of vibration of the blade:
a – 1st lamellar form of the investigation blade;
б – third bending form for classic blade; *в* – photo of nodal lines of
 investigation blade and constable view of slow lines of investigation blade
 with classic blade – 1st lamellar form is
 identical to third bending form by the nature of the pattern
 of nodal lines on the blade

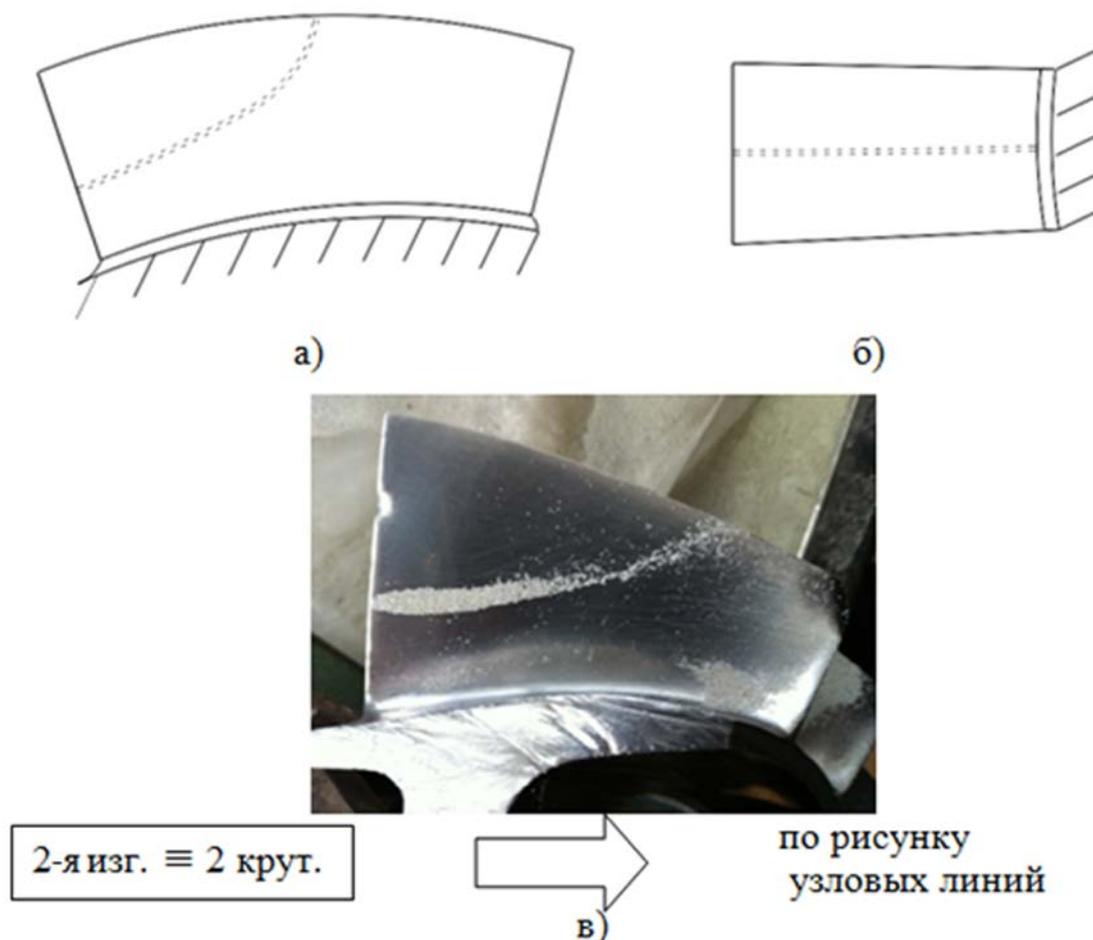


Рис. 8. Узловые линии для колебания лопатки:

a – по 2-й изгибающей форме для исследуемой лопатки; *б* – по 2-й крутильной форме для классической лопатки; *в* – фото узловых линий на исследуемой лопатке и сопоставление вида узловых линий исследуемой лопатки с классической лопаткой – 2-я изгибающая форма тождественно равна 2-й крутильной форме по характеру узловых линий

Fig. 8. A nodal line of vibration of the blade:

a – 2nd bending form of the investigation blade; *б* – 2nd torsion form for classic blade; *в* – photo of nodal lines of investigation blade and constable view of slow lines of investigation blade with classic blade – 2nd bending form is identical to 2nd torsion form by the nature of the pattern of nodal lines on the blade

По аналогии с данным экспериментом можно сделать сопоставление и по более сложным формам колебаний лопаток. Полученные спектры собственных форм и частот колебаний для данного вида лопаток позволяют провести дальнейшее исследование максимальных напряжений, возникающих в лопатке, с применением воздушного вибростенда и определить места разрушения данных видов лопаток, следовательно, нарисовать графики напряжений в лопатках, изменить конструкцию, усилить ее, подобрать режимы работы двигателя, определить фактический ресурс вспомогательного двигателя [9, 10, 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования выявили следующие особенности для данных лопаток:

– лопатки широкохордные, переменные по толщине, с коротким пером имеют два совмещенных (наложенных) спектра собственных форм и частот колебаний [7];

– экспериментально получены некоторые смешанные формы, не характерные для классических лопаток (если судить по рисунку узловых линий). В данных широкохордных лопатках сказывается и влияние большой крутки и формы лопатки (сужение к выходной кромке), частоты их близки (наблюдается при эксперименте четкое плавное изменение или переход одних узловых линий в другие). Плавно изменяется и амплитуда колебаний зон пера при переходах;

– собственные частоты при различных формах колебаний лопаток достаточно близки (16250–16400, 1740–1760 Гц);

– проявляются формы колебаний разных спектров. Собственные частоты колебаний расположены близко. В исследуемом диапазоне их больше, чем для обычной, классической лопатки;

– исследуемая лопатка имеет более «широкий диапазон резонансных частот» для своих колебаний;

– в обычных лопатках (большой длины и крутки) иногда проявляются «дубли» – колебания вдоль оси минимальной жесткости, в исследованной лопатке имеются свои «дубли», отличающиеся от обычных, но имеющие некоторое сходство [4];

– исследованные лопатки отличаются большой динамической напряженностью и возбуждаемостью по сравнению с обычными. Они более склонны к автоколебаниям и к «захвату» возбуждающими силами [5].

По результатам проведенных исследований выявлена необходимость создать более общую теорию колебаний лопаток компрессоров с учетом полученных экспериментальных данных. Это представляется полезным для появляющихся сложных конструкций лопаток с дисками.

Усталостные разрушения должны проявляться чаще и иметь «нетрадиционный» характер. В конкретном случае могут проявиться связанные колебания нескольких рядом стоящих лопаток и одновременно проявиться разрушения двух лопаток или разрушения лопаток через одну вместе с частью диска. При этом характер трещин должен быть примерно одинаковым, как и их размеры [6]. Лопаткам присущ незначительный декремент колебаний, что плохо с точки зрения прочности. Можно предположить, что при образовании мелких забоин от попадания посторонних предметов на входную кромку может произойти разрушение лопатки или каскада лопаток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов В.П.** Колебания рабочих колес турбомашин. М.: Машиностроение, 1983. 224 с.
2. **Белоусов М.Г.** Методология исследования разрушений лопаток компрессоров авиадвигателей // Наука, техника, человек: межвузовский сборник научных работ. Вып. 4. М.: МГТУ ГА, 2012.
3. **Гишваров А.С.** Анализ эксплуатационных разрушений летательных аппаратов и двигателей: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2003. 289 с.
4. **Белоусов Г.Г.** Некоторые результаты исследования сопротивления усталости лопаток компрессоров при колебаниях по высокочастотным формам // Тезисы докладов Международного симпозиума «Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения» 25–28 сентября 1984 г. / Академия наук УССР. Институт проблем прочности. Киев: Наукова думка. С. 24–25.
5. **Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И.** Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1976. 216 с.
6. **Гарф М.Э.** Развитие усталостных трещин в материалах и конструкциях / О.Ю. Крамаренко, М.Я. Филатов, Э.Я. Филатов. Киев: Наукова Думка, 1980. 148 с.

7. Рудавец В.А., Шорр Б.Ф. Расчет собственных частот и форм пространственных колебаний закрученных компрессорных лопаток // Теория оболочек и пластин: труды VIII Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин. Ростов н/Д, 1971. М.: Наука, 1973. С. 550.

8. Turso J., Litt J. A Foreign Object Damage Event Detector Data Fusion System for Turbofan Engines NASA/TM-2004-213118. 2004. P. 20.

9. Белоусов М.Г., Белоусов Г.Г. Разрушение лопаток компрессоров авиадвигателей в условиях эксплуатации // Труды 54-й научной конференции МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе». М.: МФТИ, 2011. 157 с.

10. Сиротин Н.Н. Конструкция и эксплуатация, повреждаемость и работоспособность газотурбинных двигателей: учебник. М.: РИА «ИМ-ИНФОРМ», 2002. 439 с.

11. Ананьев И.В., Тимофеев П.Г. Колебания упругих систем в авиационных конструкциях и их демпфирование. М.: Машиностроение, 1965. 197 с.

12. Мавлютов Р.Р. Проблемы концентрации напряжений в авиационных конструкциях // Прочность элементов авиационных конструкций. Труды УАИ им. С. Орджоникидзе. 1973. Вып. 40. 65 с.

13. Белоусов М.Г., Цуркаль А.А. Исследование факторов, влияющих на повреждаемость и разрушение лопаток компрессоров авиационных двигателей // Труды МАИ: электронный журнал. 2013. Вып. 65. 14 с.

14. Машошин О.Ф., Чичков Б.А. Рабочие лопатки авиационных ГТД: конструкция, прочность, эксплуатация: учебное пособие. М.: МГТУ ГА, 2017. 80 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Белоусов Михаил Григорьевич, ведущий инженер АО «ГСС», Skyeuropeline@ya.ru.

Машошин Олег Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, o.mashoshin@mstuca.aero.

EXPERIMENTAL STUDY OF NATURAL FORMS AND THE VIBRATION FREQUENCIES OF THE COMPRESSOR BLADES OF AIRCRAFT AUXILIARY POWER UNIT

Mikhail G. Belousov¹, Oleg F. Mashoshin²

¹ *Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTUCA), Moscow, Russia*

² *Leading Engineer of SCAC, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The article presents the results of the blades vibration studies, where the blades are rigidly fixed to the disk of the high-pressure compressor of the auxiliary power unit (APU). The task of the study is set because of the destruction of the blades cascade, which led to the APU failure. The designated APU resource was not provided. Destruction of compressor blades occurred since the introduction of gas turbine engines, but it was not always possible to comprehensively investigate the problem and completely prevent the destruction of compressor blades. Analysis of fatigue failure statistics led to the conclusion that all the blades, regardless of their size and material are destroyed in certain areas on the back, edges and tip. The relative coordinates of the crack location are approximately the same. This indicates the availability of common patterns of the blades dynamic loading and the resulting tension in them with resonance vibrations. Moreover, the availability of operational damage on the blades does not affect these patterns. However, these patterns are not fully applicable to the blades represented in this study (wide-chord, with variable thickness from the leading to the trailing edge), but they have some similarities. The study of the forms spectrum and the blade frequency vibration is the first step in solving the problem of the blades destruction. Every detail has an infinite number of frequency characteristics that

form the spectrum. Each frequency of natural oscillations corresponds to its own form of vibration. The form of the vibrations is determined by the pattern of alternating displacements or deflections and the position of the nodal lines. In nodal lines the displacements are infinitely small and considered null. The displacements of the vibrating sections on different sides of the nodal lines are in antiphase. The combination of the vibration shapes forms a variety of shapes. In this study, a sand method for determining the spectrum of vibration frequencies was used. This experiment will allow to define the sectors of defects occurrence with the subsequent development of fatigue cracks and to define real dynamic loading of the given blades design.

Key words: APU high pressure compressor, gas turbine engine, compressor blades, fatigue failure, form of oscillations, spectra of vibrations, cracks, natural oscillations.

REFERENCES

1. **Ivanov, V.P.** (1983). *Kolebanija rabochih koles turbomashin* [Vibration of the turbo engine units rotor wheels]. Moscow: Mashinostroenie [Machine building industry], 224 p.
2. **Belousov, M.G.** (2012). *Metodologiya issledovaniya razrusheniy lopatok kompressorov aviadvigateley* [Methodology of research of aircraft engines compressors blades destruction]. Science, technology, a human being: interuniversity collection of scientific works. Moscow: MSTUCA, vol. 4, 148 p.
3. **Gishvarov, A.S.** (2003). *Analiz ekspluatatsionnykh razrusheniy letatel'nykh apparatov i dvigateleyx.* [Analysis of operational destruction of aircraft and engines]. Textbook. Ufa: USATU, 289 p.
4. **Belousov, G.G.** (1984). *Nekotorye rezul'taty issledovaniya soprotivleniya ustalosti lopatok kompressorov pri kolebaniyah po vysokochastotnym formam* [Some results of the study of fatigue resistance of compressor blades with fluctuations in high-frequency forms]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnogo simpoziuma «Prochnost' materialov i jelementov konstrukcij pri zvukovyh i ul'trazvukovyh chastotah nagruzhenija»* [Abstracts of the report of the international Symposium «Strength of materials and structural elements at acoustic and ultrasonic loading frequencies»]. 25–28 September 1984. Kiev: Naukova dumka Akademija nauk Ukrainskoj SSR [Academy of Sciences of the Ukrainian SSR]. *Institut problem prochnosti* [Institute for problems of strength], pp. 24–25.
5. **Kuznecov, N.D. and Cejtlin, V.I.** (1976). *Jekvivalentnye ispytaniya gazoturbinnih dvigatelej* [Equivalent tests of gas-turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie [Machine building industry], 216 p.
6. **Garf, M.Je., Kamarenko, O.Yu., Filatov, M.Ya and Filatov, E.Ya.** (1980). *Razvitee ustalostnyh treshhin v materialah i konstrukcijah* [Development of fatigue cracks in materials and designs]. Kiev: Naukova Dumka, 1980, 148 p.
7. **Rudavets, V.A. and Shorr, B.F.** (1973). *Raschet sobstvennih kolebanii i form prostanstvennih zakruchennih kompressornih lopatok* [Calculation of natural frequencies and forms of spatial vibrations of twisted compressor blades]. *Teoriya obolochek i plastin: Trudy VIII Vsesoyuznoy konferentsii po teorii obolochek i plasti* [Theory of shells and plates]. The proceedings of the VIIIth all-USSR conference. Rostov-on-Don, 1971. Moscow: Nauka, p. 550.
8. **Turso, J. and Litt, J.** (2004). *A Foreign Object Damage Event Detector Data Fusion System for Turbofan Engines NASA/TM–2004–213118*, 20 p.
9. **Belousov, M.G. and Belousov, G.G.** (2011). *Razrushenie lopatok kompressorov aviadvigateley v usloviyakh ekspluatatsii* [The destruction of aircraft engines compressors blades under operating conditions]. *Trudy 54-y nauchnoy konferentsii MFTI «Problemy fundamental'nykh i prikladnykh estestvennykh i tekhnicheskikh nauk v sovremennom informatsionnom obshchestve»* [Problems of fundamental and applied natural and technical sciences in the modern information society. The proceedings of the 54th scientific conference of MFTI]. Moscow: MFTI, 157 p.
10. **Sirotnin, N.N.** (2002). *Konstruktsiya i ekspluatatsiya, povrezhdaemost' i rabotosposobnost' gazoturbinnih dvigateley* [Design and operation, damageability and operability of gas turbine engines]. Manual. Moscow: RIA “IM-INFORM”, 439 p.

11. Анап'ев, I.V. and Timofeev, P.G. (1965). *Kolebanija uprugih sistem v aviacionnyh konstrukcijah i ih dempfirovanie* [Vibrations of elastic systems in aviation structures and their damping]. Moscow: Mashinostroenie [Machine building industry], 197 p.

12. Mavlyutov R.R. (1973). *Problemy koncentracii naprjazhenij v aviacionnyh konstrukcijah* [Problems of concentration of tension in aviation designs]. The strength of the elements of aircraft structures. Trudy UAI. S. Ordzhonikidze, iss. 40, 65 p.

13. Belousov, M.G. and Tsurkal, A.A. (2013). *Issledovanie faktorov, vliyayushchih na povrezhdaemost' i razrushenie lopatok kompressorov aviacionnyh dvigatelej* [The study of factors that influence the damageability and destruction of the compressors blades of aircraft engines]. Online magazine "Trudy MAI", iss. 65, 14 p.

14. Mashoshin, O.F. and Chichkov, B.A. (2017). *Rabochie lopatki aviacionnyh GTEs: konstrukciya, prochnost', ehkspluataciya* [Rotor blades of aircraft gas turbine engine: design, strength, operation]. Training manual. Moscow: MSTUCA, 80 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail G. Belousov, Leading Engineer of SCAC, Skyeuropeline@ya.ru.

Oleg F. Mashoshin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Aircraft Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, o.mashoshin@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 09.02.2018
Принята в печать 17.07.2018

Received 09.02.2018
Accepted for publication 17.07.2018