

Ю. А. НОЖНИЦКИЙ, Ю. А. ФЕДИНА, Д. В. ШАДРИН, Б. МИЛАТОВИК

ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН НА ДИНАМИЧЕСКОМ РАЗГОННОМ СТЕНДЕ

Экспериментальное исследование вибрационной прочности вращающихся лопаток турбомашин имеет ключевое значение для предотвращения дефектов, связанных с многоцикловою усталостью. Рассмотрены вопросы проведения динамических испытаний роторов турбомашин и оптимизации конструкционного демпфирования с использованием разгонных стендов. Для проведения испытаний вращающихся лопаток на многоцикловою усталость должны быть обеспечены эффективное возбуждение колебаний, высокая точность регулирования и поддержания частоты вращения исследуемого ротора, наличие токосъемника и бесконтактной системы измерения колебаний лопаток. Всем этим требованиям отвечает комплекс разгонных стендов Test Devices Inc. (США), приобретаемый ЦИАМ. *Динамический разгонный стенд; разгонные испытания; конструкционное демпфирование; вибропрочность; многоцикловая усталость*

Значительная часть выявляемых в эксплуатации дефектов двигателей связана с недостаточной вибрационной прочностью деталей. Дефекты, связанные с многоцикловою усталостью, могут существенно снизить экономическую эффективность эксплуатации двигателей многодвигательных летательных аппаратов. Предотвращение связанных с многоцикловою усталостью дефектов деталей двигателей однодвигательных летательных аппаратов имеет большое значение для обеспечения безопасности эксплуатации [1].

При создании перспективных двигателей проблема предотвращения разрушений деталей в результате многоцикловою усталости обостряется. Это связано с повышением напорности ступеней, применением обладающим плотным спектром частот собственных колебаний широкохордных лопаток, использованием узлов с низким конструкционным демпфированием (блисков, блингов), усилением связанности колебаний, применением обладающих высокой чувствительностью к дефектам недостаточно пластичных материалов, ростом статических напряжений в деталях и возрастанием температуры этих деталей, увеличением наработки двигателей без съема с крыла. Следует также иметь в виду известные трудности прогнозирования и экспериментального подтверждения вибрационной прочности деталей двигателей.

В связи с этим в последние годы интенсивно развиваются технологии предотвращения разрушения деталей двигателей, прежде всего рабочих лопаток турбомашин, от многоцикловою усталости [1].

Уровень вибрационных напряжений в лопатках во многом определяется демпферами, эффективность которых зависит от центробежных сил, возникающих при вращении рабочего колеса. Расположение в лопатке очага разрушения зависит от распределения действующих в лопатке вибрационных и обусловленных вращением ротора статических напряжений. Наличие статических напряжений оказывает влияние на сопротивление материала лопатки многоцикловою усталости.

Отмеченные обстоятельства обуславливают необходимость проведения исследований вибрационной прочности лопаток в поле центробежных сил (при вращении ротора). В то же время осуществление таких испытаний на двигателе требует значительных затрат времени и средств. При испытаниях на двигателе возникают также трудности с исследованием альтернативных конструктивно-технологических решений, с проведением необходимых измерений. Это определяет актуальность проведения части исследований вибрационной прочности на разгонных стендах с возбуждением колебаний вращающихся лопаток.

Опыт показывает, что динамические разгонные стенды (ДРС) могут эффективно использоваться для проведения следующих видов работ по обеспечению вибрационной прочности деталей роторов, в первую очередь, лопаток [1–6]:

- исследование резонансных режимов и построение диаграммы Кэмпбелла;
- анализ влияния на вибрационное состояние связанности колебаний (взаимодействия лопаток с диском, разночастотности лопаток, наличия демпферов);

- оптимизация конструкционного демпфирования;
- построение диаграммы Гудмена для определенной формы колебаний конкретной детали;
- исследование влияния на место образования трещины статических и вибрационных нагрузок;
- анализ влияния на сопротивление многоциклового усталости повреждений (от попадания посторонних предметов, фреттинга и др.);
- отработка технологий изготовления лопаток или ремонта лопаток с эксплуатационными повреждениями;
- оценка влияния на долговечность детали совместного действия повреждающих факторов при малоциклового (МЦУ) и многоциклового (МнЦУ) усталости;
- проведение резонансных испытаний;
- калибровка аппаратуры для бесконтактного контроля вибраций вращающихся деталей;
- отработка методик бесконтактного обнаружения повреждений от посторонних предметов и других дефектов вращающихся деталей;
- получение необходимых исходных данных для расчетного анализа проблем аэроупругости и вибрационной прочности.

В ЦИАМ накоплен значительный опыт использования разгонных стендов для исследования и оптимизации конструкционного демпфирования колебаний лопаток рабочих колес турбин. Для возбуждения колебаний используются специальные турбулизаторы и воздушные сопла (рис. 1).

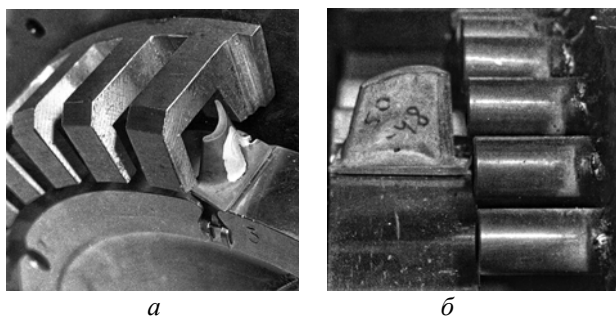


Рис. 1. Возбуждение колебаний лопаток на разгонном стенде: *а* – специальными турбулизаторами, *б* – воздушными соплами

Пример применения динамического разгонного стенда для исследования конструкционного демпфирования дан на рис. 2, на котором показаны амплитудно-частотные характеристики лопатки без демпфера и с демпфером.

Вместе с тем для проведения испытаний вращающихся лопаток на многоциклового усталость должны быть обеспечены эффективное (достаточное для получения уровня вибрационных напряжений, необходимого для получения усталостного разрушения лопатки) возбуждение колебаний, высокая точность регулирования и поддержания частоты вращения исследуемого ротора (для точной настройки на резонансный режим и поддержания заданного режима в процессе испытаний), наличие токосъемника (для передачи на аппаратуру сигналов от размещенных на роторе тензодатчиков и термопар) и бесконтактной системы измерения колебаний лопаток (для обеспечения возможности поддержания требуемого режима при выходе из строя тензодатчиков и/или токосъемника).

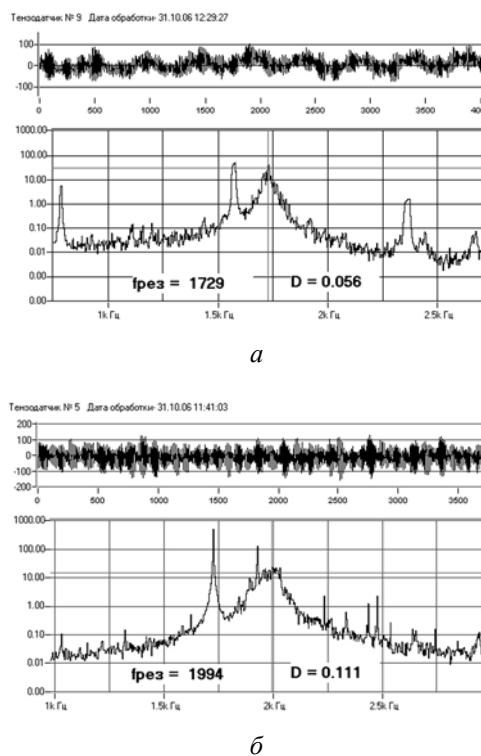


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика лопатки: *а* – без демпфера, *б* – с демпфером

Известны способы возбуждения колебаний деталей роторов на разгонных стендах с использованием [1–6]:

- кинематической связи ротора с электродинамическим вибростендом;
- неподвижных или вращающихся от независимого привода стационарных воздушных струй (раскрутка ротора при частичном вакуумировании или в атмосферных условиях);
- турбулизаторов потока или генераторов воздушных импульсов (раскрутка ротора при частичном вакуумировании или в атмосферных условиях) – эффективное возбуждение колеба-

ний лопаток по низшим формам при температуре до $\sim 800\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$, раскрутка при частичном вакуумировании;

- пьезовибраторов, закрепленных на деталях (недостаточная для испытаний на усталость эффективность возбуждения);

- струй жидкости (масла или масляного тумана) – наиболее высокая эффективность возбуждения при температуре до $220\text{--}250\text{ }^\circ\text{C}$ (опасность эрозии лопаток, трудности использования для оценки демпфирования);

- вихревых токов (постоянных магнитов) – невысокая эффективность возбуждения колебаний деталей из титановых и никелевых сплавов, опасность перегрева лопаток, помехи в работе измерительной аппаратуры;

- передачи нагрузок через магнитные подшипники опор ротора (при использовании магнитных подшипников).

Проведенный анализ показал, что наиболее эффективным способом возбуждения высокочастотных колебаний лопаток турбомашин по сложным формам колебаний является использование струй масла, расположенных в осевом или радиальном направлении. Однако этот метод позволяет проводить испытания лишь при невысокой (до $\sim 220\text{ }^\circ\text{C}$) температуре. Кроме того, при возбуждении колебаний струями масла необходимо избежать капельной эрозии лопаток. Поэтому известны попытки возбуждения колебаний лопаток масляным туманом, однако более эффективным является возбуждение колебаний тонкими струями масла.

Для возбуждения колебаний при более высокой температуре (до $700\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$) предпочтительным является возбуждение колебаний воздушными импульсами (при частичном вакуумировании камеры стенда).

Требуемая точность регулирования частоты вращения ($\pm 0,5$ об/мин) исследуемого ротора может быть обеспечена при использовании в качестве привода воздушной турбины и специальной системы управления частотой вращения. Эта система должна также обеспечить возможность изменения частоты вращения с заданной скоростью для точной настройки на резонанс. На рис. 3 иллюстрируется обеспечение стабильности параметров в процессе испытаний на резонансном режиме [4, 6].

Для передачи сигналов от тензодатчиков и термопар, установленных на вращающемся роторе, могут использоваться контактные (щеточные или с ртутными кольцами) и бесконтактные (с телеметрической или оптической передачей сигнала) токосъемники. Для бесконтактного

измерения колебаний применяются вихретоковые, индукционные и оптические системы.

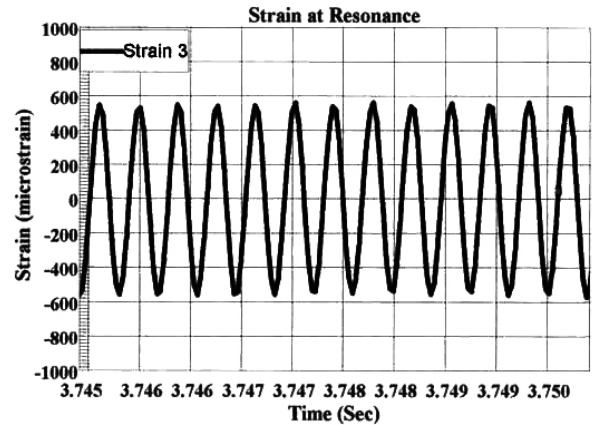


Рис. 3. Изменение уровня вибрационных напряжений при испытании на многоцикловую усталость. По оси ординат – микродеформация (тензодатчик №3), по оси абсцисс – время (сек)

Желательно, чтобы разгонный стенд был универсальным и мог использоваться для широкого спектра испытаний, т.е. не только для определения вибрационных характеристик лопаток.

Фирма Test Devices Inc. (США) разрабатывает разгонные стенды, которые обладают следующими особенностями:

- малоинерционным приводом (реверсивная воздушная турбина);
- вакуумной камерой;
- автоматизированным воспроизведением заданного цикла изменения частоты вращения ротора;
- эффективным возбуждением высокочастотных колебаний вращающихся лопаток (струями масла, воздушными импульсами);
- точной настройкой и поддержанием заданной частоты вращения (режима резонансных колебаний лопаток);
- высокооборотным токосъемником;
- бесконтактным (в темпе эксперимента) измерением параметров колебаний лопаток (с помощью лазерной системы или вихретоковых датчиков);
- измерением вытяжки ротора в темпе эксперимента (с использованием вихретоковых датчиков);
- диагностикой появления трещин;
- высокоскоростной видеокамерой;
- возможностью проводить испытания при повышенной температуре и температурном градиенте с заданием до 7 зон нагрева;

- возможностью балансировки исследуемого ротора на стенде при высокой частоте вращения.



Рис. 4. Оснастка для возбуждения колебаний блиска первой ступени компрессора высокого давления

В настоящее время успешно завершены предварительные приемочные испытания на ДРС блиска компрессора высокого давления и проводится работа по монтажу стенда и подготовке к окончательным приемочным испытаниям. В ходе предварительных испытаний было осуществлено успешное возбуждение колебаний с требуемой амплитудой струями масла (рис. 4) при определенных в результате расчета частотах и формах колебаний. Полученные результаты подтвердили работоспособность оборудования. В рамках окончательных испытаний планируется провести испытания блиска компрессора высокого давления (с возбуждением колебаний струями масла) и рабочего колеса турбины высокого давления с небандажированными лопатками (с возбуждением колебаний воздушными импульсами) на многоцикловую усталость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proceedings of the 10-th National Turbine Engine HCF Conferences, March 8-11, 2005, New Orleans, USA.
2. Оптимизация демпферов колебаний рабочих лопаток турбин / Ю. А. Ножницкий, Б. Ф. Шорр, Г. В. Мельникова, Ю. А. Федина и др. // RELMAS'2008: сб. тр. конф. 2008. С. 261–264.
3. **Ножницкий Ю. А., Федина Ю. А., Милатовик Б.** Применение динамических разгонных стендов для исследований вибрационной прочности деталей роторов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., г. Самара, Россия, 24-26 июня 2009. Т.2. С. 70–71.

4. **Milatovic B.** Dynamic Spin Rig - The Next Generation in Engine Components Test Capability. Сб. тезисов научно-технического конгресса по двигателестроению, 15-16 апреля 2010, г. Москва, С.88-91.

5. **Provenza A. J. Duffy K. P.** Experimental Methodology for Determining Turbomachinery Blade Damping Using Magnetic Bearing Excitation and Non-Contacting Optical Measurement. ASME, GT2010 – 22093, 2010.

6. Методические особенности испытаний рабочих лопаток турбомашин на многоцикловую усталость на динамическом разгонном стенде / Ю. А. Ножницкий и др. // Труды ЦИАМ №1344. М. 2010. С. 146–174

ОБ АВТОРАХ

Ножницкий Юрий Александрович, нач. отд. прочности, зам. ген. директора ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», дипл. инж.-механик по авиац. двигателям (МАИ, 1971). Д-р техн. наук по тепл. двиг. летат. аппаратов (1997). Иссл. в обл. прочностной надежности авиадвигателей.

Федина Юлия Алексеевна, нач. сектора ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», дипл. инж. по авиац. двиг. (МАТИ, 1981). Канд. техн. наук (2000). Иссл. в обл. виброиспытаний на динамических разгонных стендах.

Шадрин Дмитрий Владимирович, инж. ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», дипл. инж. по газотурб. двиг. и энергоуст. (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008). Иссл. в обл. виброиспытаний на динамических разгонных стендах.

Милатовик Борислав, директор по перспективным технологиям фирмы Test Devices, Inc. (США). Иссл. в обл. виброиспытаний на динамических разгонных стендах.