

УДК 621.378:535

Р.Х. МАКАЕВА, А.Х. КАРИМОВ, А.М. ЦАРЕВА, Б.Р. ГАЙФУЛЛИН

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ), Россия*

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПЕРЕГРЕВА ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГТД С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Статья посвящена исследованиям возможности применения голографической интерферометрии для неразрушающего контроля перегрева материала лопаток турбины ГТД. Исследовались вибрационные характеристики деталей: собственные частоты и резонансные формы колебаний лопаток до и после перегрева. Экспериментальные исследования проводились методом голографической интерферометрии усреднения по времени. Установлено, что перегрев материала лопаток ведет к снижению значений собственных частот колебаний лопаток, а также — к изменению картины резонансных форм колебаний в высокочастотном диапазоне. Результаты исследований показывают возможность применения голографической интерферометрии для неразрушающего контроля перегрева лопаток турбины ГТД.

Ключевые слова: лопатка турбины, вибрация, собственные частоты, формы колебаний, голографическая интерферометрия.

Долговечность и надежность авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) определяется не только конструктивными решениями, но и во многом зависит от материалов деталей двигателя. В виду особых эксплуатационных условий: лопатки турбины — как самые нагруженные детали самолета — изготавливаются из жаропрочных сплавов, так как они должны сохранять повышенную прочность при высоких температурах.

В процессе эксплуатации ГТД случаются неисправности двигателей, сопровождаемые повышением температуры газов в турбине. При этом происходит перегрев лопаток. Под перегревом подразумевают нагрев материала всей лопатки или ее части до температуры, превышающей расчетную для данного сплава. Расчетная температура для сплава определяется принятыми соотношениями напряжений и длительностью работы лопатки на максимальных режимах двигателя [1]. Обычно расчетная температура нагрева лопаток в эксплуатации, несколько ниже температуры, характерной для относительно устойчивого структурного состояния сплава. Поэтому при нормальной эксплуатации двигателя материал лопатки турбины сохраняет в основном структуру и прочностные свойства, приданные ему термической обработкой в процессе изготовления детали.

Перегрев лопаток турбины ГТД, если он не вызывает их оплавление или трещин ползучести, приводит к быстрым структурным изменениям в сплаве, особенно в поверхностных

слоях. При этом материал лопатки теряет оптимальную структуру, в результате чего меняются его механические свойства.

Одной из наиболее значимых деталей в газотурбинном двигателе является рабочая лопатка турбины I-й ступени. На ее работоспособность влияют факторы, обусловленные высокими динамическими нагрузками, а также превышением расчетных параметров двигателя по температуре в эксплуатации. Закономерные изменения в материале лопаток под действием указанных факторов приводят к преждевременному старению материала.

Перегрев вызывает ухудшение прочностных характеристик сплавов, в результате чего образуются дефекты. В настоящее время перегрев деталей из жаропрочных сплавов определяется разрушающими методами контроля: из лопаток вырезают образцы для контроля структурного состояния материала.

О материале жаропрочных сплавов можно судить по их деформационным характеристикам. Известно, что деформация зависит от механических свойств, обусловленных состоянием материала. В случае перегрева происходит изменение механических свойств материала, уменьшается изгибная жесткость, а это может привести к изменению картины поля деформации на лопатке.

Изменение характера деформации лопатки хорошо определяет голографическая интерферометрия.

Известна работа М.А. Заруцкого по обнаружению изменений структуры материала

лопаток турбины из жаропрочного никелевого сплава ЭИ-437. В этой работе детали нагружали изгибным деформирующим усилием. Изменение геометрии поверхности фиксировали голографическим методом двух экспозиций. На голографических интерферограммах лопаток получали картины регулярных полос, количество которых при фиксированных нагрузках зависело от разной эксплуатационной наработки и перегрева лопатки.

Таким образом, при заданных условиях нагружения была выявлена связь между числом интерференционных полос на интерферограмме и структурным изменением материала лопаток турбины.

Наиболее информативными являются голографические интерферограммы колебаний объектов на высоких частотах [3], поскольку установлено, что лопатки почти каждого типа дают одинаковые картины собственных форм на низких частотах (100...15000 Гц) независимо от их конфигурации и размеров. На более высоких частотах картины собственных форм в большей степени зависят от физических характеристик лопаток.

Известно, что изучение собственных частот объектов основывается на исследовании резонансных колебаний, при которых частота возмущающей силы близка к его одной из собственных частот и резонансные вибрации воспроизводят форму одного из собственных колебаний объекта [4].

В работе использовался голографический метод анализа колебаний, предложенный Пауэллом и Стетсоном [5].

Эксперимент проводился на рабочей лопатке I-й ступени ГТД, изготовленной из жаропрочного сплава ЖС6УВИ. Деталь крепилась в специальном приспособлении. Условия закрепления лопаток оставались неизменными. Разброс резонансных частот при многократных идентичных закреплениях лопатки была поряд-

ка 0,7% относительно среднеарифметического значения параметра. Возбуждение колебаний, контроль частот и регистрация голограмм производились способом, описанным в работе [6].

В результате эксперимента были получены голографические интерферограммы резонансных форм колебаний лопатки турбины I-й ступени ГТД в диапазоне частот 600...36000 Гц. Амплитуда колебаний подбиралась таким образом, чтобы на интерферограмме было достаточное количество разрешенных интерференционных полос. При этом фиксировались уровень нагрузки (В) и уровень возбуждения колебаний по отклику микрофона (дБ).

Затем лопатки подвергались термическому воздействию путем нагревания ее в печи при температуре 1150 °С в течение 30 минут. Металлографические исследования показали изменение структуры металла в связи с разупрочнением сплава.

Охлажденная лопатка устанавливалась в приспособлении, и в ней возбуждались резонансные колебания тем же способом.

Для сравнения состояния перегретой лопатки с прежним ее состоянием необходимо было получить одинаковые по амплитуде картины форм колебаний. Это достигалось посредством регулировки подающего от генератора на вибратор сигнала. Последний генерировал тот же уровень возбуждения колебаний лопатки, что и при регистрации голографических интерферограмм лопатки в исходном состоянии. Однако для получения прежних значений отклика (дБ), а, следовательно, тех же самых амплитуд, необходимо было усиливать сигнал уровня вибрационного нагружения (В). Можно сделать предположение, что перегретый материал лопатки обладает более высокими демпфирующими свойствами.

В табл. 1 приведены результаты замеров значений резонансных частот колебаний лопатки

Таблица 1

Значения собственных частот колебаний лопатки турбины I-й ступени ГТД, Гц		Разница значений собственных частот, Гц	Уровень возбуждения колебаний, дБ
до перегрева	после перегрева		
9171	9057	114	79
11019	10896	123	75
24327	23938	389	80
24752	24368	384	70
27814	27566	248	68
29214	28705	509	73
29548	29032	516	70
31173	30799	374	65
35446	34801	645	58
36219	35500	719	55

На рис. 1 представлены некоторые интерферограммы форм колебаний лопатки, зафиксированных в указанном диапазоне.

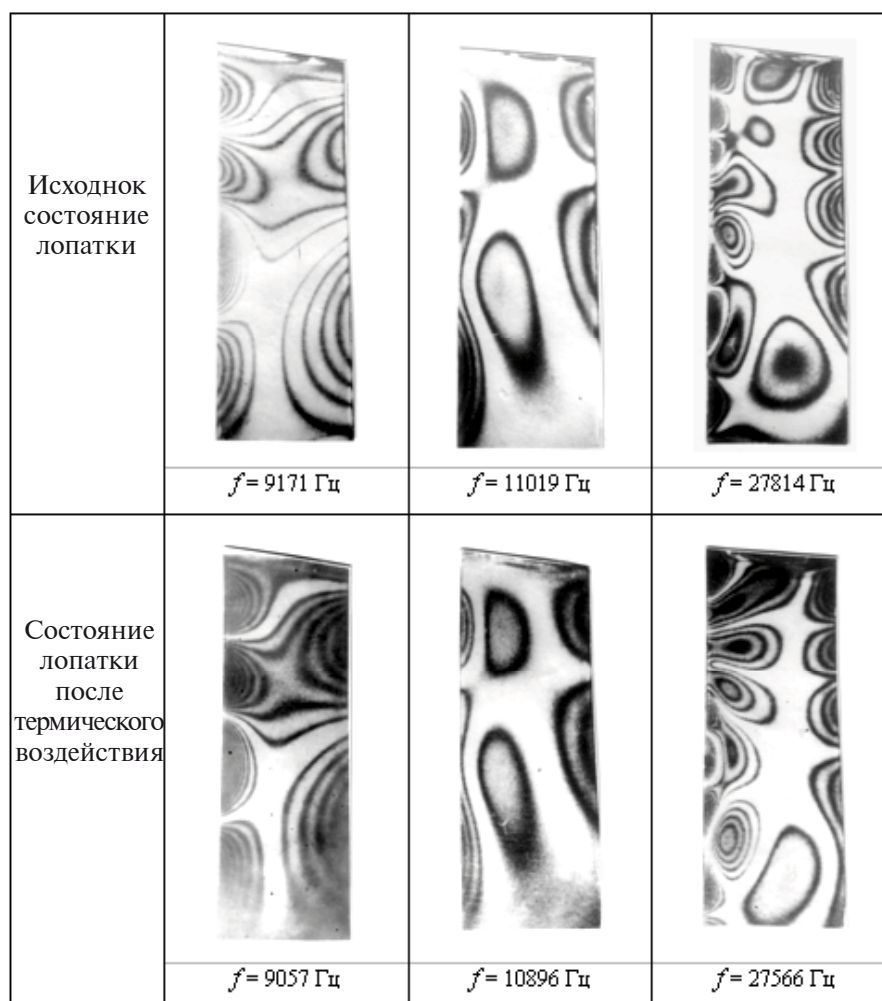


Рис. 1. Голографическая идентификация состояния лопатки до и после перегрева

турбины I-й ступени ГТД. Анализ частотных характеристик показывает, что перегрев материала сопровождается изменением значений резонансных частот в сторону уменьшения.

Сравнение форм колебаний лопатки до и после теплового воздействия показало, что интерферограммы низкочастотных колебаний, например, при $f = 9117 \text{ Гц}$, $f = 11019 \text{ Гц}$ (формы колебаний лопатки в исходном состоянии) и при $f = 9057 \text{ Гц}$, $f = 10896 \text{ Гц}$ (формы колебаний лопатки после термического воздействия) имеют идентичный характер и заметно не отражают изменения деформационных свойств материала.

Эксперименты показали, что в частотном диапазоне свыше 25000 Гц картины резонансных форм колебаний чувствительны к изменению деформационных характеристик. Это проявилось в изменении рисунка форм колебаний лопатки в перегретом состоянии

по сравнению с начальным. На примере высокочастотных форм колебаний при $f = 27814 \text{ Гц}$ (лопатки в исходном состоянии) и $f = 27566 \text{ Гц}$ (форма колебаний лопатки после термического воздействия) видно изменение поля деформации на поверхности лопатки вдоль выходной кромки, выраженное изменением характера интерференционных полос.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что между характером картин высокочастотных форм колебаний по голографическим интерферограммам и состоянием материала жаропрочных сплавов существует связь. Локальные изменения состояния материала в результате перегрева можно определить по изменению рисунка высокочастотных форм колебаний.

Проведенные исследования показали возможность применения голографической ин-

терферометрии для неразрушающего контроля перегрева лопаток турбины.

Литература

1. Химушин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. [Текст] / Ф.Ф. Химушин. – М.: Металлургия, 1969. – 752 с.
2. Заруцкий М.А. Идентификация структуры материала деталей методом голографической интерферометрии [Текст] / М.А. Заруцкий // Оптическая голография и ее применение / под ред. Ю.Н. Денисюка и Ю.И. Островского – Л.: Наука, 1977. – С. 86 – 95.
3. Голографические неразрушающие исследования [Текст]: пер. с англ. / под ред.

Р.К. Эрфа – М.: Машиностроение, 1979. – 448 с.

4. Бабаков И.М. Теория колебаний. [Текст] – / И.М. Бабаков. – М.: Наука, 1965. – 560 с.

5. Powell R.L. Interferometric vibration analysis of three-dimensional objects by wave-front reconstruction [Text] / R.L. Powell, K.A. Stetson // J. Opt. Soc. Amer. – 1965. – Vol. 55. – P. 612.

6. Макаева Р.Х. Определение вибрационных характеристик деталей ГТД методом голографической интерферометрии [Текст] / Р.Х. Макаева, А.Х. Каримов, А.М. Царева // Изв. вузов. Авиационная техника. 2007. № 1. – С. 78 - 80.

Поступила в редакцию 10.05. 2014

Р.Х. Макаева, А.Х. Каримов, А.М. Царева, Б.Р. Гайфуллин. Неразрушающий контроль перегрева лопаток турбины ГТД с применением голографической интерферометрии

Статья посвящена исследованиям возможности применения голографической интерферометрии для неразрушающего контроля перегрева материала лопаток турбины ГТД. Исследовались вибрационные характеристики деталей: собственные частоты и резонансные формы колебаний лопаток до и после перегрева. Экспериментальные исследования проводились методом голографической интерферометрии усреднения по времени. Установлено, что перегрев материала лопаток ведет к снижению значений собственных частот колебаний лопаток, а также – к изменению картины резонансных форм колебаний в высокочастотном диапазоне.

Результаты исследований показывают возможность применения голографической интерферометрии для неразрушающего контроля перегрева лопаток турбины ГТД.

Ключевые слова: лопатка турбины, вибрация, собственные частоты, формы колебаний, голографическая интерферометрия.

R.Kh. Makayeva, A.Kh. Karimov, A.M. Tzareva, B.P. Gaifullin. Non-destructive testing of overheat GTE turbine blades with using Holographic interferometry method

The article is sanctified to researches of possibility of application holographic interferometry for non-destructive testing of overheat the GTE turbine blades material.

Vibration characteristics of details were researched: own frequencies and vibration resonant oscillatory forms of blades before and after an overheat.

Experimental researches were conducted by holographic interferometry method of averaging on time.

It is set that the overheat of blades material conduces to the decline of own vibration frequencies values of blades, and also - to the change of picture of vibration resonant forms in a high-frequency range.

The researches results show the possibility of application of holographic interferometry for non-destructive testing of an overheat of GTE turbine blades.

Key words: turbine blade, vibration, own frequencies, mode shape, holographic interferometry.