

УДК 621.452.3.017

А.Н. Петухов, А.Н. Стадников, М.Ю. Миллер, Е.С. Руденко

ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ПО 1-Й КРУТИЛЬНОЙ ФОРМЕ КОЛЕБАНИЙ

Исследованы частотные характеристики крупногабаритной (длиной более 1200 мм) рабочей лопатки из сплава ВТ6 паровой турбины. Разработана и изготовлена специальная оснастка с высокой жесткостью и значительной массой (более 300 кг) с симметричным креплением двух лопаток. Экспериментально определены первые четыре формы собственных колебаний и выявлены формы колебаний с максимальными напряжениями в верхних сечениях профильной части (3-я и 4-ая формы колебаний лопатки – 3-я изгибная и 1-ая крутильная формы). Определен предел выносливости лопаток при колебаниях по 1-ой крутильной форме.

Ключевые слова: частотные характеристики лопатки, формы колебаний, узловые линии, многоцикловая усталость, предел выносливости.

Введение

Экспериментальное исследование динамической прочности натуральных лопаток энергетических установок относится к достаточно сложным научным и техническим задачам, т.к. исследуемые объекты уникальны, крупногабаритны и весьма дороги.

Для испытания на многоцикловую усталость (МнЦУ) лопаток необходимы специальные оборудование и оснастка, а также опыт выполнения подобных испытаний.

В статье приводятся экспериментальные исследования низших частот и форм собственных колебаний лопаток из сплава ВТ6 паровой турбины, распределений напряжений, а также экспериментальная оценка предела выносливости лопаток с разрушениями в верхних сечениях профильной части при собственных колебаниях по обертонам.

1. Объект исследования

Объектом исследования были крупногабаритные рабочие лопатки (массой 16,5 кг) из сплава ВТ6 паровой турбины.

Характерные геометрические параметры лопатки:

- высота профильной части лопатки составляет 1200 мм;
- торцевое сечение профильной части лопатки оканчивается бандажной полкой высотой 20 мм и шириной 41 мм;

- угол закрутки лопатки от корневого сечения до бандажной полки составляет 95°;
- среднее значение хорды по высоте профильной части составляет ~ 180 мм;
- на лопатке имеется два пояса шириной ~ 40 мм с увеличенной толщиной профиля пера (пояса усиления пера) с отверстиями для тросовых бандажных связей, расположенных от полки хвостовика соответственно на расстояниях 520 мм (первый пояс) и 870 мм (второй пояс), плавно сопрягающиеся с профильной частью.

2. Средства исследования

Для выполнения исследований характеристик МнЦУ лопаток с разрушениями в верхних сечениях профильной части, характерными при собственных колебаниях лопаток по обертонам, потребовалось:

- разработать и изготовить специальную с высокой жесткостью и значительной массой оснастку с симметричным креплением двух лопаток;
- для проведения экспериментальных исследований внести дополнения и уточнения в действующий методики.

Возбуждение собственных колебаний лопаток и усталостные испытания лопаток были выполнены на вибростенде V8-440 фирмы LDS.

Разработанная оснастка и применение современного оборудования позволили реализовать

возбуждение нескольких низших форм собственных колебаний лопаток с уровнем амплитуды переменных напряжений, достаточным для проведения испытаний на МНЦУ.

Масса исследуемого объекта в сборе (две лопатки с приспособлением) составила ~ 315 кг при общей длине цепочки «лопатка – приспособление – лопатка» ~ 2900 мм (рис. 1).



Рис. 1. Вибростенд с лопатками в сборе:

1 - исследуемая лопатка; 2 - лопатка-противовес; 3 - приспособление для крепления лопаток; 4 - профилированные зажимы (4 шт.); 5 - вибростенд; 6 - лазерная головка; 7 - пятно лазерного луча на лопатке 1

Для определения на вибростенде частот и форм собственных колебаний лопаток применялся лазерный сканирующий виброметр PSV-400-1D фирмы Polytec (поз. 6 – лазерная головка виброметра, системный блок и компьютер не показаны).

Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) лопаток при собственных колебаниях в характерных зонах профильной части лопатки, включая пояса усиления с отверстиями, были наклеены одно- и трехкомпонентные (розетки) фольговые тензорезисторы базой 3 мм с сопротивлением активной решетки 350 Ом. В процессе исследований они неоднократно переклеивались.

3. Результаты исследования частотных характеристик и НДС

Собственные колебания лопаток исследовались в частотном диапазоне до 200 Гц.

На рис. 2 приведена спектрограмма колебаний лопатки. Определены формы собственных колебаний лопатки: первому резонансу соответствует первая изгибная форма, второму – вторая изгибная, третьему – третья изгибная и четвертому – первая крутильная формы (рис. 3 а, б).

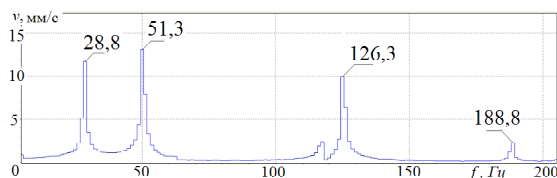


Рис. 2. Спектрограмма колебаний лопатки в частотном диапазоне до 200 Гц

Экспериментальные и расчетные значения (расчет частот собственных колебаний лопатки и распределений напряжений выполнен ОАО «Силловые машины») частот низших четырех форм собственных колебаний лопатки составили: экспериментальные (средние по 8-ми лопаткам) – 29 Гц, 51 Гц, 126 Гц, 190 Гц, и расчетные – 25,7 Гц, 51,2 Гц, 112,9 Гц, 176,9 Гц. Различие экспериментальных и расчетных значений частот составило около $\sim 10\%$. Следует отметить, что в эксперименте фиксирование лопаток осуществлялось по елочному хвостовику, в расчетах лопатка фиксировалась по корневому сечению пера (по полке хвостовика) и не учитывались отверстия в поясах усиления пера.

Экспериментальная оценка НДС лопатки при собственных колебаниях по исследуемым формам удовлетворительно совпала с расчетными данны-

ми (в виду ограниченного объема статьи табличные результаты не приводятся): зоны с максимальными напряжениями в эксперименте и в расчете совпадают, соотношения напряжений для различных зон близки по значениям для изгибных форм, но несколько отличны у крутильной формы. Экспериментальные и расчетные напряжения оценены в продольном направлении лопатки.

Из полученных результатов следовало, что максимальные напряжения в верхних сечениях профильной части (между вторым поясом усиления и бандажной полкой) реализуются при колебаниях по третьей изгибной и первой крутильной формам, причем максимальные напряжения для крутильной формы (рис. 3) размещены ближе к бандажной полке.

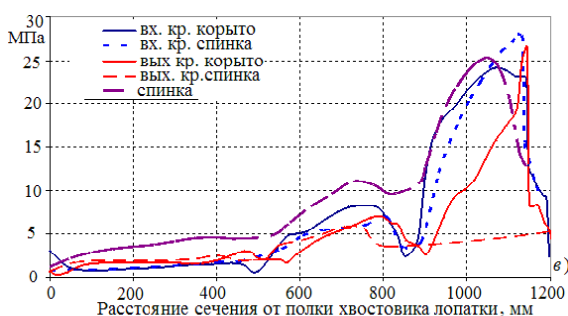
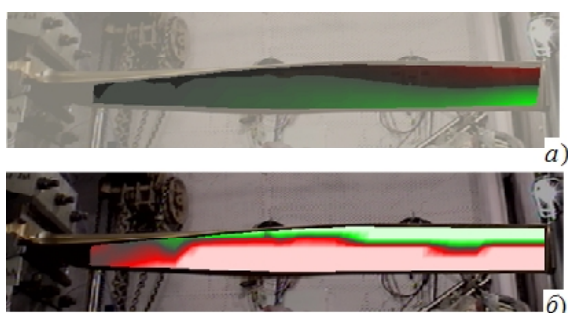


Рис. 3. Колебания лопатки по 1 крутильной форме: а) - форма колебаний; б) - положение узловой линии; в) - расчетное распределение напряжений по высоте лопатки при амплитуде колебаний 1мм (максимальная амплитуда на бандажной полке)

Для крутильной формы собственных колебаний лопаток замеренные максимальные деформации (максимальные напряжения σ_{max}) расположены на входной и выходной кромках на удалении 77...80 мм от торца бандажной полки, причем на входной кромке со стороны спинки, а на выходной - со стороны корыта. Наибольшие замеренные деформации у наклонного отверстия второго усиления пера по спинке и по корыту оказались на большой полуоси эллипса со стороны острого угла, величина напряжений оказалась равной (0,43...0,53) σ_{max} . Оценка фактической величины напряжений у отверстия явля-

ется специальной задачей, решаемой совместными расчетным и экспериментальными способами, и в данном исследовании не проводилась.

4. Испытания лопаток на МнЦУ

Испытания лопаток на усталость проводили на вибростенде V8-440 при резонансных колебаниях по четвертой форме (первой крутильной форме) при нормальной температуре (рис. 1).

При выбранной камертонной схеме возбуждения двух лопаток в оснастке на вибростенде режимным испытаниям подвергалась одна (исследуемая) лопатка. Вторая лопатка являлась противовесом, уровень нагружения ее при испытаниях на МнЦУ составлял не более 15% от уровня нагружения исследуемой лопатки.

Ограниченное число лопаток не позволило провести испытания на МнЦУ с использованием стандартного метода испытания, поэтому для определения предела выносливости был применен метод «лестницы» [1,2]. Первая лопатка была испытана при амплитуде $\sigma_{max} = 320$ МПа. Величина ступеньки перегрузки лопаток составляла $\Delta\sigma_{max} = 20$ МПа. За базу испытаний принималась $N_b = 2 \cdot 10^7$ циклов.

Результаты испытаний представлены на рис. 4.

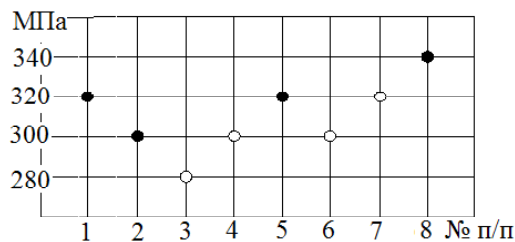


Рис. 4. Результаты испытаний лопаток по методу

«лестницы»: ● - лопатка разрушилась;
○ - лопатка не разрушилась

Предел выносливости лопаток при колебаниях по первой крутильной форме при нормальной температуре на базе $N = 2 \cdot 10^7$ циклов составил $\sigma_{-1} = 300$ МПа. Разрушения лопаток происходили в периферийных сечениях профильной части у входной кромки и у наклонных отверстий во втором поясе усиления пера по спинке и по корыту на большой полуоси эллипса со стороны острого угла.

В лопатке №1 образовались две трещины: сквозная трещина длиной ~ 40 мм на входной кромке на удалении ~ 80 мм от торца бандажной полки с направлением распространения под углом ~ 75° к продольной оси лопатки (на рис. 5 и далее стрелками указаны начало, середина и конец трещины).

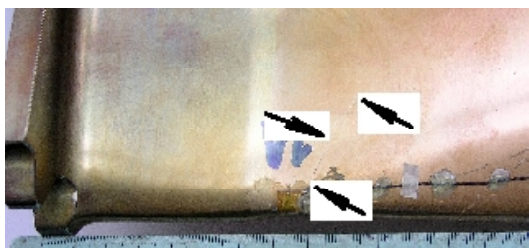
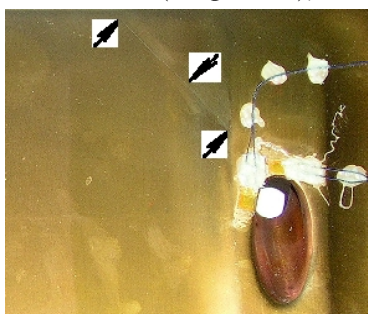


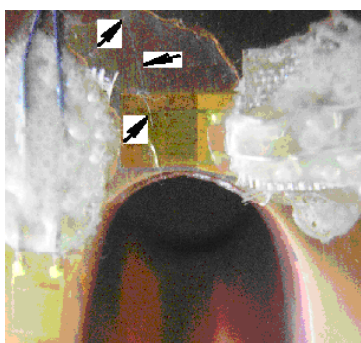
Рис. 5. Вид первой усталостной трещины в лопатке №1

В лопатке № 2 также образовались две трещины:

- первая трещина длиной ~ 74 мм на корыте у наклонного отверстия под углом ~ 45° к продольной оси лопатки (см. рис. 6 а);



а



б

Рис. 6. Вид усталостных трещин в лопатке №2: а - первой трещины; б - второй трещины

- вторая трещина длиной ~ 24 мм на спинке у наклонного отверстия под углом ~ 10° к поперечной оси лопатки (см. рис. 6 б).

На лопатке № 5 образовались три трещины:

- поперечная трещина длиной ~ 15 мм на спинке у входной кромки без выхода на нее на удалении ~ 100 мм от торца бандажной полки;

- трещина длиной ~ 65 мм на корыте у наклонного отверстия под углом ~ 40° к поперечной оси лопатки;

- трещина длиной ~ 20 мм на спинке у наклонного отверстия под углом ~ 25° к поперечной оси лопатки.

На лопатке №8 образовалась одна трещина длиной ~ 65 мм на спинке у наклонного отверстия под углом ~ 35° к поперечной оси лопатки.

По полученным результатам можно заключить, что разрушения лопаток в периферийных сечениях профильной части у входной кромки и у наклонных отверстий во втором поясе усиления пера практически равновероятны.

Выводы

Исследованы низшие четыре формы собственных колебаний лопаток: первая, вторая и третья изгибные, а также четвертая или первая крутильная формы.

Показано, что в сечениях верхней части пера максимальные напряжения возникают при колебаниях лопаток по третьей изгибной и по первой крутильной формам.

Среднее значение предела выносливости лопаток на базе $N_6 = 2 \cdot 10^7$ циклов при колебаниях по первой крутильной форме при нормальной температуре составило $\sigma_{-1} = 300$ МПа.

Литература

1. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей [Текст]: моногр. /И.А. Биргер, Б.Ф. Балашов, Т.К. Брагина, Р.А. Дульнев, Т.П. Захарова, Л.А. Козлов, А.Н. Петухов. - М.:Машиностроение, 1981. - 221 с.

2. Петухов, А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД [Текст]: моногр. /А.Н. Петухов. - М.: Машиностроение, 1993. - 240 с.

Поступила в редакцию 30.05.2012

A.N. Petukhov, A.N. Stadnikov, M.J. Miller, E.S. Rudenok. Experimental examination of frequency characteristic and determination of hfc blade turbine over first torsional oscillation mode

Explored frequency features long (the length more than 1200 mm) worker blades from alloy VT6 steam turbine. It is designed and made special rig with high acerbity and significant mass (more than 300 kg) with symmetrical fastening two blades. Experimental are determined first four oscillation mods and is revealed oscillation mods with maximum stress in upper sections profile part (3-d and 4-th oscillation mods of the blade - 3-d bending and 1-st torsional oscillation mod). Determined endurance limit (HFC) of the blades at 1st torsional oscillation mod. Endurance limit of blades on the basis of $2 \cdot 10^7$ cycles amounted to 300 MPa.

Key words: steam turbine, blade frequency characteristics, oscillation mode, node lines, high cycle fatigue, endurance limit.