

УДК 531.781.2

Ю. А. ГУСЕВ, канд. техн. наук, доц.; проф. Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков;

КАХРАИ КАМБИЗ, аспирант Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков;

Г. А. ПРОЧАН, главный конструктор ГП «ЗМКБ Прогресс», Запорожье;

Ю. А. ЯКОВЛЕВ, начальник ЭИО ГП «ЗМКБ Прогресс», Запорожье

ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

Приведены условия, при которых проводятся исследования вибронапряженного состояния лопаток турбин ГТД с применением тензорезисторов. Рассматриваются тензорезисторы с пленочным чувствительным элементом (ВПТ) на основе платины и металлокерамики и изолятором – подложкой из высокотемпературного цемента фосфатного твердения и методика исследований вибродеформаций элементов ГТД с их применением. Приведены результаты испытаний высокотемпературного пленочного тензорезистора на вибропрочность и схема технологического процесса их закрепления (нанесения) на лопатке турбины. Приведены результаты применения высокотемпературных пленочных тензорезисторов.

Ключевые слова: тензорезистор, чувствительный элемент, изолятор-подложка, связующее, газотурбинный двигатель, турбокомпрессор, рабочая лопатка, вибропрочность, резонанс.

Введение

Рассматриваются исследования вибронапряженного состояния элементов ГТД с применением высокотемпературных пленочных тензорезисторов (ВПТ), работающих в сложных условиях: воздействие высокоскоростных (до 600 м/с) и химически агрессивных газовых потоков с температурой до (1300–1500) °С, приводящее к значительным механическим нагрузкам и эрозионным явлениям. Высокие обороты роторов вызывают предельно высокие растягивающие напряжения от центробежных сил [1, 2].

Чувствительный элемент (ЧЭ) тензорезистора выполнен в виде пленки платины, а также из композиций платина – керамики. Изолятор – подложка – цемент фосфатного твердения. Суммарная толщина ВПТ не превышает 100–150 мкм, а база тензорезистора – 2–4 мм. Малая толщина тензорезистора, а также надежная диффузионная связь изолятора – подложки с телом исследуемой детали [1, 2] обеспечивают их высокую вибропрочность и значительный ресурс в сложных условиях работы ГТД.

Методика исследований вибродеформаций элементов ГТД с применением ВПТ заключается в нанесении ВПТ на исследуемую деталь; выборе и проверке регистрирующей аппаратуры и предварительной ее калибровке, проведении измерений, обработке результатов измерений.

Высокий температурный коэффициент сопротивления (т.к.с.) ЧЭ позволяет использовать ВПТ для одновременного измерения деформации и температуры лопатки в месте закрепления ВПТ.

Нами была разработана измерительная схема для ВПТ (рис. 1), основанная на потенциометрическом способе подключения и позволяющая проводить одновременные измерения динамической деформации и температуры. На ВПТ 3 (см. рис. 1) через балластное сопротивление 2 подается постоянное напряжение от стабилизированного источника питания 1. Переменная составляющая напряжения, возникающая вследствие изменения сопротивления чувствительного элемента под влиянием динамической

© Ю.А. Гусев, Кахраи Камбиз, Г.А. Прочан, Ю.А. Яковлев, 2015

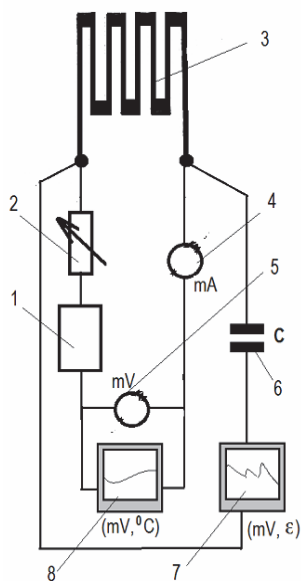


Рис. 1 – Потенциометрическая схема подключения ВПТ для одновременного измерения динамической деформации и температуры: 1 – источник напряжения; 2 – регулировочное сопротивление; 3 – ВПТ; 4 и 5 – приборы для градуировки измерительного канала; 6 – разделительный конденсатор; 7 и 8 – ПЭВМ для регистрации деформации и температуры

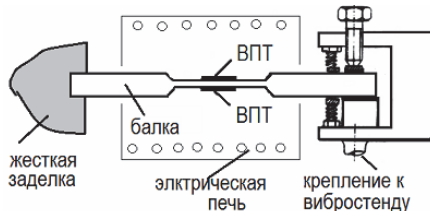


Рис. 2 – Конструктивная схема вибрационной установки типа П-594: 1 – упругий элемент; 2 – ВПТ

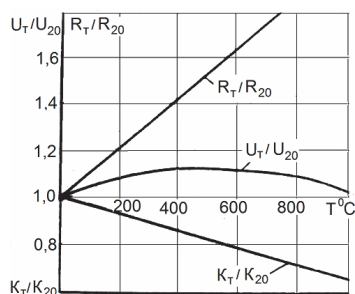


Рис. 3 – Изменение выходного сигнала – (U_T/U_{20}) ВПТ с платина-керамическим чувствительным элементом, температурной характеристики – (R_T/R_{20}) и функции тензочувствительности – (K_T/K_{20}) в зависимости от температуры

деформации, через разделительный конденсатор 6 подается и регистрируется на ПЭВМ 7. Постоянная или медленно изменяющаяся температурная составляющая сигнала тензорезистора фиксируется ПЭВМ 8. Для настройки измерительного канала используются цифровые миллиамперметр и милливольтметр – 4, 5.

Предварительная градуировка измерительного канала проводилась с помощью камертонного устройства [3] в диапазоне температур 20–1100 °С.

Исследования ВПТ на вибропрочность

Испытания проводились на вибрационной установке, конструктивная схема которой представлена на рис. 2. Упругий элемент (балка) с закрепленным на нем ВПТ устанавливается на стойке вибростенда. Противоположный конец балки закрепляется жестко в специальной станине. Для нагрева образца использовалась электрическая печь. Уровень деформации, воспринимаемый балкой, определялся по величине ее прогиба, регистрируемого с помощью катетометра КМ-8. Температура образца в месте закрепления ВПТ определялась хромель-алюмелевой термопарой.

Сигнал от ВПТ регистрировался по схеме, приведенной на рис. 1, а электроизоляционные свойства изолятора-подложки измерялись с помощью мегомметра типа МОМ-3.

В качестве измеряемых параметров была выбрана: выходной сигнал ВПТ – U_T , температура T С сопротивление чувствительного элемента ВПТ – R_T , сопротивление изоляции – $R_{ИЗ}$ и динамическая деформация – ϵ . При этом анализировалась зависимость выходного сигнала от температуры при фиксированных значениях динамической деформации и тока питания ВПТ. Воспроизводимость характеристики проверялась при 6-ти циклических нагревах от 200 °С до 1000 °С и уровне вибрдеформации до $\pm 60 \cdot 10^{-5}$ единиц относительной деформации– (е.о.д).

Исследования стабильности характеристик ВПТ проводилось при

температуре 1000 °С, динамической деформации до $\pm 60 \cdot 10^{-5}$ е.о.д и частоте колебаний порядка 100 Гц и представлены на рис. 3.

При испытаниях на вибропрочность ВПТ балки с тензOMETрами нагревались до температуры 1000 С и нагружались динамической деформацией – $(50-60) \cdot 10^{-5}$ е.о.д. При этом регистрировалось количество циклов деформирования, которые выдерживает ВПТ до разрушения. Рабочий ресурс ВПТ составляет $5 \cdot 10^6$ и более циклов деформирования, что в 5–20 раз больше рабочего ресурса тензорезисторов с чувствительными элементами из нихромовой проволоки, являющихся в настоящее время основным средством измерения динамических деформации деталей ГТД.

Исследование вибросостояния лопатки турбины малоразмерного ГТД

Для тензометрирования были выбраны рабочие лопатки турбокомпрессора (ТК) турбовального двигателя АИ–450М. Материал рабочих лопаток – жаропрочный сплав ЖС32. Тензорезисторы наносились в местах максимальных вибрационных напряжений лопаток – у входной кромки пера со стороны «спинки», для регистрации колебаний лопатки по основному тону (первая изгибная форма), и корневого сечения «корыта» для анализа высокочастотной изгибно-крутильной форм колебаний рис. 4.

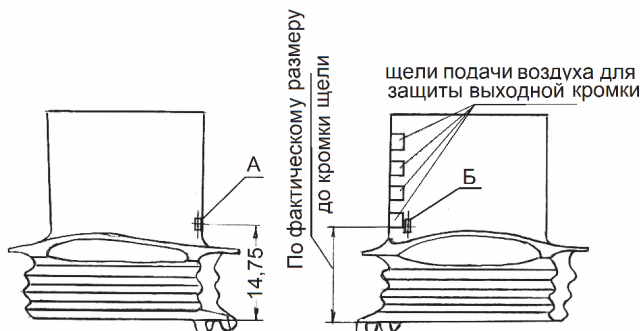


Рис. 4 – Лопатки турбины турбо-компрессора препарированные ВПТ

Процесс закрепления (создания) пленочных тензорезисторов на поверхности лопаток турбин состоит из следующих этапов: создание изолятор-подложки, нанесение металлической пленки ЧЭ и отводящих низкоомных пленок, подсоединение отводящих проводников и может быть представлен схемой технологического процесса рис. 5.

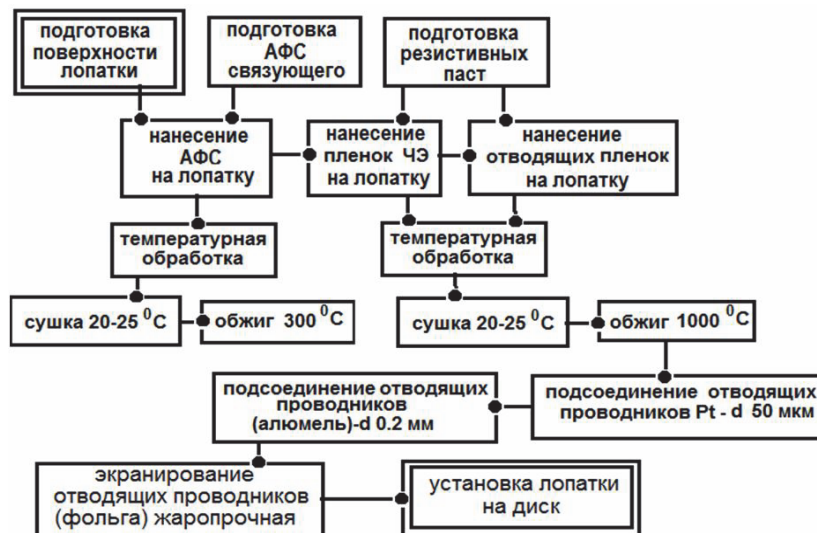


Рис. 5 – Схема технологического процесса нанесения ВПТ на лопатку турбины

Особенности препарирования лопаток ВПТ позволили получить малобазные тензорезисторы с толщиной 100–150 мкм, в то же время суммарная толщина нихромовых проволочных тензорезисторов составила около 1 мм. Отводящие проводники ВПТ были подсоединены к чувствительным элементам способом вжигания электропроводящих паст.

Общий вид лопаток турбины, препарированных ВПТ, представлены на рис. 5, а диск турбины с ВПТ на рис. 6.



Рис. 6 – Диск турбины турбо-компрессора с закрепленными ВПТ

Тензометрированное РЛ проведено до максимально допустимой в эксплуатации частоты вращения ротора $n = 55430$ об/мин, а также при $n = 57400$ об/мин составляющие от требуемой нормативными документами величину 103 %.

Наибольшие вибрационные напряжения в РЛ ТК составляют:

– $\sigma_{\max} = 3,7$ кгс/мм² (1-я изгибная форма) – $n = 50820$ об/мин, $K = 12$, $f = 10164$ 1/с;

– $\sigma_{\max} = 5$ кгс/мм² (высокочастотная форма колебаний) – $n = 53180$ об/мин, $K = 19$, $f = 16843$ 1/с.

В течение этих испытаний была достигнута значительная наработка РЛ циклов колебаний на резонансах с кратностями частот $K = 12$ и $K = 19$ многократно превысившая стандартную базу испытаний $N_6 = 2 \cdot 10^7$ при исследованиях на выносливость деталей ГТД.

При частоте вращения ротора $n = 57400$ имеет место резонансные колебания РЛ с кратностью $K = 10$ и с уровнем напряжений $\sigma_{\max} = 1,5$ кгс/мм².

Распределение вибрационных напряжений в исследуемых лопатках ТК двигателя (тензорезистор – Б), при различных резонансных режимах их работы, в зависимости от оборотов ротора представлено на рис. 7.

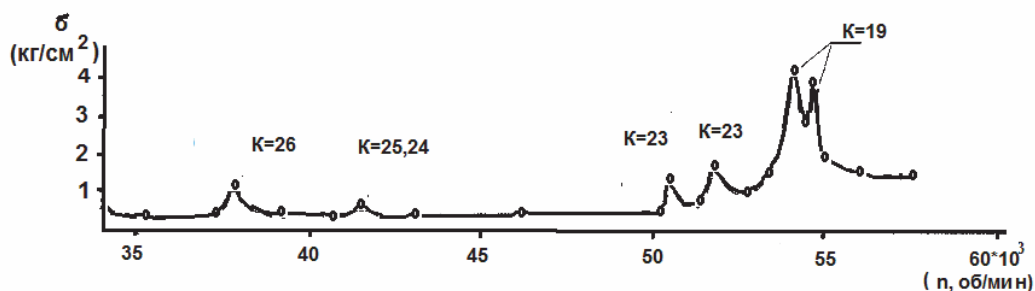


Рис. 7 – Распределение вибрационных напряжений в исследуемых лопатках турбины ТК, при различных резонансных режимах их работы

Виброметрия «тонкостенной» компрессорной лопатки турбовального двигателя

В лаборатории вибро-прочностных испытаний Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» были выполнены исследования вибро-напряженного состояния компрессорной лопатки ТВД ТВ-3-117 с использованием ВПТ. Была поставлена задача определения вибронапряжений малоразмерной компрессорной лопатки и степени влияния препарировки тензометров на частоту первой формы ее изгибных колебаний. Анализируемая лопатка последней ступени компрессора имеет высоту пера – 14 мм и толщину профиля у корневого сечения 0,6 мм. Условия работы компрессорной лопатки в общих чертах можно охарактеризовать следующими параметрами: температура лопатки (400–450) °С, частота вращения ротора до 20000 об/мин, расчетная частота первой формы собственных колебаний 3500 Гц. Материал лопатки сплав ЭП-479 (ІХІ6Н2).

Высокий температурный режим работы анализируемой лопатки предусматривает применение обычных проволочных нихромовых высокотемпературных тензорезисторов со связующим цементом Ц165-32А. Их применение приводит к существенному изменению жесткости лопатки за счет увеличения суммарной толщины и в свою очередь к значительным изменениям собственных частот до 10–15 % и до 200–300 % по амплитудам колебаний лопатки.



Рис. 8 – Малоразмерная лопатка компрессора с малобазным ВПТ

Были выбраны ВПТ с эмалевыми изоляторами-подложками из ЭЖ-1000 и платиновым чувствительным элементом типа 1. База ВПТ в связи с малыми размерами лопатки была выбрана 2 мм, номинальное сопротивление чувствительного элемента при однопетлевой конструкции тензорезистора составляло 20 Ом. Тензорезисторы размещались в корневом сечении лопатки (рис. 8) с целью определения вибронапряжений, обусловленных первой изгибной формой колебания лопатки.

Для проведения сравнительных исследований на трех компрессорных лопатках были закреплены обычные проволочные тензорезисторы с базой 3 мм а связующим – цементом типа Ц165-32А.

С целью определения влияния пленочных и проволочных тензорезисторов на жесткость лопатки, последние закреплялись в приспособлении, которое в свою очередь устанавливалось на вибростенде. Лопатка вводилась в резонанс и при этом замерялись: двойная

амплитуда колебаний A_1 , частота колебаний f_1 и мощность N , затрачиваемая вибростендом. Затем, не убирая подмагничивания катушки вибратора, удалялся тензорезистор.

После включения подмагничивания вновь замерялась двойная амплитуда A_2 и частота колебания лопатки f_2 , но уже без тензорезистора.

Величина, характеризующая степень влияния тензорезистора и его массы – Δ была выбрана как отношение амплитуды колебаний лопатки без тензорезистора к амплитуде колебаний лопатки с тензорезистором (см. таблицу 1).

В таблица 1 приведены результаты рассмотренных экспериментальных исследований, в которых под порядковыми номерами 1–5 приведены данные,

касающиеся компрессорных лопаток, препарированных ВПТ, а под номерами 6 сравнительные данные по лопатке с проволочным малогабаритным тензорезистором.

Таблица 1.

Значения собственных частот колебания лопаток компрессора с ВПТ и без него

№ п/п	Лопатка с тензорезистором			Лопатка без тензорезистора			Δ
	A_1 , мм	N , кВт	f_1 , 1/с	A_2 , (мм)	N , кВт	f_2 , 1/с	
1	0,2	0,1	3830	0,32	0,1	3790	1,6
2	0,2	0,1	3620	0,32	0,1	3590	1,6
3	0,2	0,1	3830	0,25	0,1	3750	1,25
4	0,2	0,1	3180	0,25	0,1	3060	1,25
5	0,2	0,1	3810	0,27	0,1	3690	1,35
6	0,2	0,1	3880	0,7	0,1	3470	3,5
7	0,1	–	3460	–	–	–	–
8	0,2	5	3460	0,25	5	3455	1,25
9	0,3	14	3460	0,36	14	3455	1,20
10	0,4	21	3460	0,43	21	3455	1,075

Из этих данных можно сделать вывод о том, что ВПТ незначительно искажает жесткость лопатки в среднем в 1,35 раза, а проволочный тензорезистор – до 3,5-х раз. В конечном итоге в лопатках препарированных проволочными тензорезисторами, регистрировались низкие значения вибронапряжений.

Заключение

Приведенные в работе результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что рассматриваемые высокотемпературные пленочные тензорезисторы будут востребованы при определении вибронапряженного состояния рабочих лопаток турбин современных газотурбинных двигателей.

Список литературы: 1. Пленочный тензорезистор для виброиспытаний лопаток турбин ГТД [Текст] / Ю. А. Гусев, Камбиз Кахраи, Д. Ф. Симбирский, С. С. Трипольский // *Авиационно–космическая техника и технология*. – 2012. – № 8(95). – С. 169–172. 2. Development and testing of harsh environment, wireless sensor systems for industrial gas turbines [Text] / D. Mitchell, Kultkarni, A. Lostettar, M. Schupdach // *Proceeding of ASME Turbo Expo for Land, Sea and Air GN 2009 June 8–12*. – Orlando ; Florida ; USA, 2009. 3. Панин, Е. А. Основы тензометрии двигателей летательных аппаратов [Текст] / Е. А. Панин. – Самара : СГАУ им. акад. С.П. Королева, 2004. – 39 с.

Bibliography (transliterated): 1. Gusev, Ju. A., et al. "Plenochnyj tenzorezistor dlja vibroispytanij lopatok turbin GTD." *Aviacionno–kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. No 8(95). 2012. 169–172. Print. 2. Mitchell, D., et al. "Development and testing of harsh environment, wireless sensor systems for industrial gas turbines." *Proceeding of ASME Turbo Expo for Land, Sea and Air GN 2009 June 8–12*. Orlando, Florida, USA, 2009. Print. 3. Panin, E. A. *Osnovy tenzometrii dvigatelej letatel'nyh apparatov*. Samara : SGAU im. akad. S.P. Koroleva, 2004. Print.

Поступила (received) 22.01.2015