

УДК 531.781.2

Ю.А. ГУСЕВ<sup>1</sup>, КАМБИЗ КАХРАИ<sup>1</sup>, Д.Ф. СИМБИРСКИЙ<sup>1</sup>, С.С. ТРИПОЛЬСКИЙ<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина<sup>2</sup>ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

## ПЛЕНОЧНЫЙ ТЕНЗОРЕЗИСТОР ДЛЯ ВИБРОИСПЫТАНИЙ ЛОПАТОК ТУРБИН ГТД

Приведены условия, при которых проводятся исследования вибронпряженного состояния лопаток турбин ГТД с применением тензорезисторов. Рассматриваются технологические особенности изготовления высокотемпературных пленочных тензорезисторов при нанесении их на исследуемую деталь – лопатку турбины. Использовались тензорезисторы с пленочным чувствительным элементом на основе металлокерамики и изолятором-подложкой из высокотемпературного цемента фосфатного твердения. Представлены такие характеристики пленочного тензорезистора как тензочувствительность и температурная чувствительность, а также приведены исследования его на термоциклическую прочность, на термоудар. Приведены результаты исследования вибронпряженного состояния лопаток турбокомпрессора малоразмерного газотурбинного двигателя. Отмечается положительные особенности применения высокотемпературных пленочных тензорезисторов не смотря на сложность технологии их нанесения на лопатку.

**Ключевые слова:** тензорезистор, чувствительный элемент, изолятор-подложка, вибронпряжение, газотурбинный двигатель.

### Введение

Для исследования вибронпряженного состояния лопаток турбин применяются высокотемпературные тензорезисторы. Тензорезисторы, размещенные на рабочих лопатках турбин ГТД, испытывают 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. Так у современных маршевых малоразмерных газотурбинных двигателей частота вращения турбокомпрессора (ТК) может составлять 57000 об/мин.

В современной высокотемпературной виброметрии при прочностных исследованиях деталей авиационных двигателей широко используются высокотемпературные тензорезисторы с чувствительными элементами из нихромовой микропроволоки [1]. Основным недостатком этих датчиков – сравнительно низкий ресурс работы при температуре 900 – 1000 °С и динамических относительных деформациях порядка  $500 \cdot 10^{-6}$ . Кроме того, в процессе препарировки лопаток турбин тензорезисторами подобного типа, как правило, перекрываются отверстия и выходные щели системы охлаждения, что недопустимо.

С 1972 года в Харьковском авиационном институте проводились работы по созданию и приме-

нению высокотемпературных пленочных тензорезисторов (ВПТ) [2], которые отличаются повышенной вибростойкостью и работоспособностью при температуре 1000 °С.

### 1. Технологические аспекты

Описаны техника изготовления и результаты испытания пленочного тензорезистора с рабочей температурой 1000 – 1050 °С.

Технология получения пленочных тензорезисторов [2], а также расширение температурного диапазона исследований различных конструкций в сторону высоких температур вновь вызвали необходимость изучения характеристик пленочных тензорезисторов при этих температурах.

Изолятор-подложка тензорезистора наносится на исследуемую деталь в виде шликера на основе оксидов металлов и фосфатных связующих, который после температурной обработки до 300 °С превращается в жаростойкое покрытие, обладающего большой стойкостью к тепловым ударам и вибропрочностью.

Чувствительный элемент тензорезистора представляет собой металлокерамическую пленку платины – палладия, получаемую из специальной пасты.

Состав металлокерамической пасты в весовых процентах: мелкодисперсный порошок платины – 20; порошок палладия – 20; двуокись кремния – 10;

окись алюминия – 10; оксид бора – 3; оксид бора – 3; оксид кальция – 3; органическое связующее – 31.

Паста, на предварительно подготовленную (обезжиренную) изолятор-подложку, наносится вручную с помощью металлического рейсфедера или с применением технологии шелкографии. Нанесенная паста подвергается сушке и температурной обработке по режиму, приведенному на рис. 1.

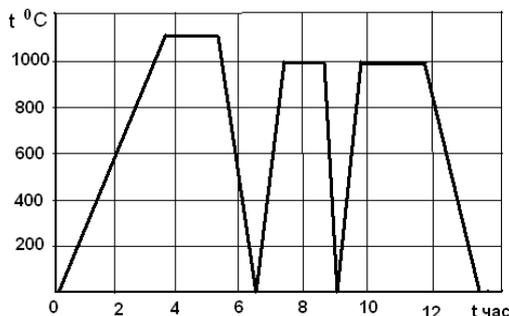


Рис. 1. Режим температурной обработки пасты

При этом из паст удаляются летучие составляющие и остается пленка платина-палладий толщиной порядка 10-40 мкм. Она обладает хорошей адгезией к изолятору-подложке (керамическому покрытию) и высокими антикоррозионными свойствами в среде агрессивных газовых потоков.

Подсоединение отводящих проводников к пленке резистора проводилось путем обволакивания этого проводника электропроводящей пастой в месте его соединения с ЧЭ, и последующим высокотемпературным нагревом места контакта.

## 2. Метрологические характеристики пленочного тензорезистора

Важнейшими характеристиками любого тензорезистора являются, его чувствительность к деформации и температуре окружающей среды. Чувствительность к деформации – функция чувствительности, должна быть максимально возможная, а к температуре – минимальная.

Коэффициент тензочувствительности пленочных тензорезисторов исследовался на градуировочной установке, использующей тарировочную балку, нагружаемую по чистому изгибу. Коэффициент тензочувствительности при комнатной температуре равен 1,8 и линейно уменьшается с ростом температуры до 1050 °C примерно на 40%, рис. 2.

В этом же диапазоне температур оценивался температурный коэффициент сопротивления (т.к.с.) при температуре 1050 и 0 °C, который определялся по формуле:

$$\text{Т.К.С.} = \frac{R_{1050} - R_0}{R_0 \cdot 1050^\circ\text{C}},$$

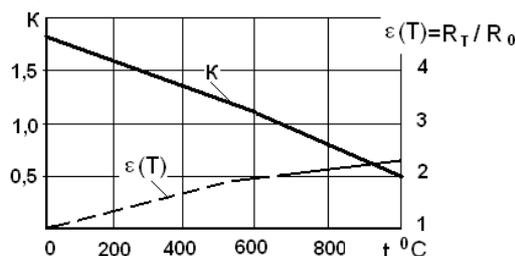


Рис. 2. Зависимость коэффициента тензочувствительности – K и температурной чувствительности –ε(T) тензорезистора с ЧЭ из платины – палладия

и для платина-палладиевого чувствительного элемента тензорезистора т.к.с. составил 0,0032 1/°C.

Как показали исследования, поперечная чувствительность пленочных тензорезисторов достаточно близка к чувствительности серийного проволоочного и, по-видимому, может быть уменьшена за счет совершенствования его конструкции. Некоторым неудобством, осложняющим применение разработанных тензорезисторов при измерении статических деформаций, является сравнительно высокое значение т.к.с. Однако, высокая рабочая температура и значительная вибростойкость являются решающим фактором при выборе типа тензорезистора. При измерении же вибродеформаций величина т.к.с. не играет существенной роли.

Описанные здесь тензорезисторы подвергались испытаниям на термоциклическую прочность, на термоудар, на вибропрочность в пламени бензиновой горелки. Испытания показали, что тензорезисторы хорошо выдерживают резкие теплосмены (более 50 теплосмен «1000 °C – минеральное масло»), а также вибродеформацию порядка 65 10<sup>-5</sup> отн. ед. при температуре 1000 – 1050 °C в течение двух часов. Проведенный анализ результатов испытаний позволил сделать вывод о возможности применения рассматриваемых тензорезисторов для виброиспытаний высоконагретых элементов турбин ГТД.

## 3. Экспериментальная часть

Схема препарирования лопаток турбин тензорезисторами по технологии, представленной в рассматриваемой работе, приведена на рис. 3, а общий вид лопаток, подготовленных к установке на диске, – на рис. 4.

Общий вид колеса турбины препарированного ВПТ представлен на рис. 5

Тензометрирование рабочей лопатки (РЛ) турбокомпрессора (ТК) произведено при запуске газогенератора, при двухминутном прогреве на режиме

малого газа, при плавном, двухминутном, переходе от режима малого газа до крейсерского режима, и при одноминутном прогреве на крейсерском режиме, а также при плавном одноминутном переходе от крейсерского до взлетного режимов.

При прогреве в течение двух минут на взлетном режиме температура газа перед колесом ТК составила 1490 °С.

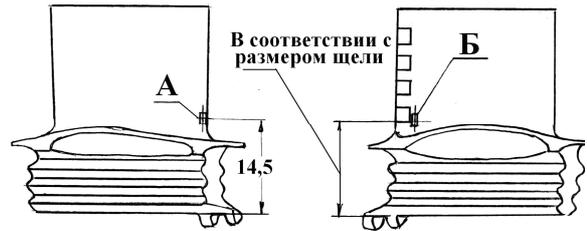


Рис. 3. Схема расположения ВПТ на лопатке турбины



Рис. 4. Общий вид лопаток ТК с ВПТ



Рис. 5. Колесо турбины с пленочными тензорезисторами на лопатках

$\epsilon = K \cdot C \cdot \text{мм}^2$       Лопатка №В744  
Тензорезистор №6Б (ПТ)

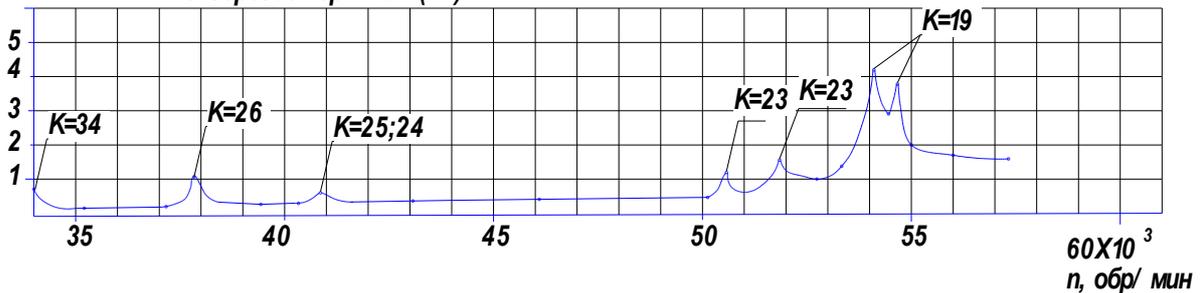


Рис. 6. Изменение вибронпряжений в лопатке ТК

По окончании прогрева на взлетном режиме было произведено кратковременное повышение частоты вращения ротора ТК от 55430 до 57093 об/мин посредством включения отбора воздуха из-за компрессора.

Резонансные колебания по первой изгибной форме в исследованном диапазоне частот вращения возбуждаются рядом гармоник газового потока, основными из которых являются гармоники  $K = 12$ ,  $K=11$  и  $K=10$ .

Наибольшие напряжения в РЛ (в месте расположения тензорезистора А) составляют:

- $\sigma_{\max} = 1,2 \text{ кг/см}^2$ ,  $K = 12$ , обороты ротора  $n = 47250 \dots 53300$  об/мин и резонансные частоты  $f = 9450 \dots 10660$  1/с;

- $\sigma_{\max} = 1,3 \text{ кг/см}^2$ ,  $K = 11$ ,  $n = 55400$  об/мин и  $f = 10156$  1/с;

- $\sigma_{\max} = 1,6 \text{ кг/см}^2$ ,  $K = 10$ ,  $n = 57400$  об/мин,  $f = 9566$  1/с.

Резонансные колебания РЛ по высокочастотной форме с кратностью основной возбуждающей гармоники  $K = 19$  происходят в диапазонах частот колебаний  $f = 16008 \dots 18006$  1/с; и частот вращения  $50550 \dots 56860$  об/мин.

Наибольшие вибронпряжения в РЛ (в месте расположения тензорезисторов Б) составляют:

- $\sigma_{\max} = 5 \text{ кг/см}^2$ ,  $n = 531180$  об/мин,  $f = 16843$  1/с, – тензорезистор ЗЖ2;

- $\sigma_{\max} = 4,2 \text{ кг/см}^2$ ,  $n = 54110$  об/мин,  $f = 17136$  1/с, – тензорезистор ВПТ.

Характер изменения вибронпряжений в рабочей лопатке турбокомпрессора, в зависимости от оборотов ротора представлен на рис. 6.

## Заключение

Таким образом, анализируя результаты экспериментальных исследований, приведенных в данной статье, можно сделать вывод о том, что, не смотря на сложность технологического процесса препарировки лопаток турбин ВПТ, открывается возможность проведения анализа их вибронапряженного состояния при температурах более 1000 °С.

## Литература

1. *Тензометрия в машиностроении [Текст]: справочное пособие / Под ред. Р.А. Макарова. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.*

2 *А.с. 877321 СССР Высокотемпературный тензодатчик и способ его изготовления (51) М.Кл 3 g 01 В 7/18 / Ю.А. Гусев, Д.Ф. Симбирский, В.Е. Ведь, В.Я. Яловенко, М.Н. Резниченко, В.М. Фролов – Заявл. 26.01.78; 2707208/25-28; опубл. 30.10.81; Бюл. № 40. – 1 с.*

Поступила в редакцию 12.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, технический директор А.В. Белогуб, ОАО «АВРАМАТ», Харьков, Украина.

### ПЛІВКОВІ ТЕНЗОРЕЗИСТОРИ ДЛЯ ВІБРОВИПРОБУВАННЯ ЛОПАТОК ТУРБІН ГТД

*Ю.О. Гусев, Камбіз Кахраї, Д.Ф. Симбірський, С.С. Трипольський*

Наведено умови, при яких проводяться дослідження вибронапруженого стану лопаток турбін ГТД із застосуванням тензорезисторів. Розглядаються технологічні особливості виготовлення високотемпературних плівкових тензорезисторів при нанесенні їх на досліджувану деталь – лопатку турбіни. Використовувалися тензорезистори з плівковим чутливим елементом на основі металокераміки та ізолятором-підкладкою з високотемпературного цементу фосфатного твердіння. Представлені такі характеристики плівкового тензорезистора як тензочуттєвість і температурна чуттєвість, а також дослідження його на термоциклічну міцність, на термоудар. Наведено результати дослідження вибронапруженого стану лопаток турбокомпресора малорозмірного газотурбінного двигуна. Відзначаються позитивні особливості застосування високотемпературних плівкових тензорезисторів не дивлячись на складність технології їх нанесення на лопатку.

**Ключові слова:** тензорезистор, чутливий елемент, ізолятор-підкладка, вибронапруга, газотурбінний двигун.

### FILM RESISTIVE-STRAIN SENSOR FOR VIBRATION TESTING OF GTE TURBINE BLADES

*Y.A. Gusev, Kambiz Kahrai, D.F. Simbirsky, S.S. Tripolsky*

The vibratory stress state research condition of GTE turbine blades using resistive-strain sensors are presented. The technological manufacturing specifics of high temperature film resistive-strain sensors while coating the experimental part – turbine blade are examined. The resistive-strain sensors with ceramic-metal-based film sensor and insulator – the padding made of high temperature phosphate hardening cement are used. Such characteristics of film resistive-strain sensor as tensosensitivity and temperature sensitivity are presented. The research of its thermal cyclic strength and thermal shock are conducted. The findings of investigation of turbocompressor blades vibratory stress state in low-sized GTE are presented. Positive features of high temperature film resistive-strain sensors utilization are mentioned despite of blade coating technology complicacy.

**Key words:** carbon, drilling, tool wear, roughness, burr.

**Гусев Юрий Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: gusev.ua@mail.ru.

**Кахраи Камбіз** – аспирант кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Симбирский Дмитрий Федорович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Трипольский Сергей Стефанович** – инженер-конструктор 1 категории ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.