

УДК 531.781.2

КАМБИЗ КАХРАИ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПЛЕНОЧНЫЙ ТЕНЗОРЕЗИСТОР И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Приведены условия, при которых проводятся исследования вибронпряженного состояния лопаток турбин ГТУ с применением тензорезисторов. Рассматриваются тензорезисторы с пленочным чувствительным элементом на основе платины и металлокерамики и изолятором подложкой из высокотемпературного цемента фосфатного твердения. Рассматриваются установки и методика проведения экспериментальных исследований основных характеристик пленочных тензорезисторов. Исследуются такие характеристики пленочного тензорезистора, как статическая характеристика преобразования при нормальной температуре, функция влияния температуры на чувствительность, температурная характеристика сопротивления, относительная поперечная чувствительность при нормальной температуре, изоляция в рабочей области значений температуры, а также исследования тензорезистора на термоциклическую прочность, на термоудар. Отмечаются положительные особенности применения высокотемпературных пленочных тензорезисторов не смотря на сложность технологии их нанесения на исследуемую деталь.

Ключевые слова: тензорезистор, чувствительный элемент, изолятор-связующее, статическая характеристика, статическая и температурная характеристики, поперечная чувствительность, газотурбинная установка.

Введение

Для исследования вибронпряженного состояния лопаток турбин применяются высокотемпературные тензорезисторы. Тензорезисторы, размещенные на рабочих лопатках турбин газотурбинных установок (ГТУ), испытывают воздействие высокоскоростных (до 600 м/с) и химически агрессивных газовых потоков с температурой до 1300-1500⁰С, приводящее к значительным механическим нагрузкам и эрозионным явлениям. Высокие обороты роторов вызывают предельно высокие растягивающие напряжения от центробежных сил. Так у современных малоразмерных газотурбинных установок частоты вращения турбокомпрессора (ТК) может составлять, 57000 об/мин.

В Харьковском национальном аэрокосмическом университете проводятся работы по созданию и применению высокотемпературных пленочных тензорезисторов (ВПТ), которые отличаются повышенной вибростойкостью и работоспособностью при температуре 1000⁰С.

Конструктивные особенности рассматриваемого пленочного тензорезистора представлены на рис. 1.

Были исследованы ВПТ с чувствительными элементами (ЧЭ) из платины двух типов: тип 1 – тонкопленочная (толщиной до 50 ангстрем) и тип 2 – толстопленочная (толщиной до 50 – 75 мкм); сплавов платина – палладий (50x50) и платина – родий (70x30), а также из композиций платина –

керамики.

Изолятор – подложка всех типов наносилась толщиной от 60 до 100 мкм. Сопротивление электрической изоляции изоляторов – подложек при максимальной температуре работы каждого типа тензорезисторов была не менее 0,05 – 0,1 Мом.

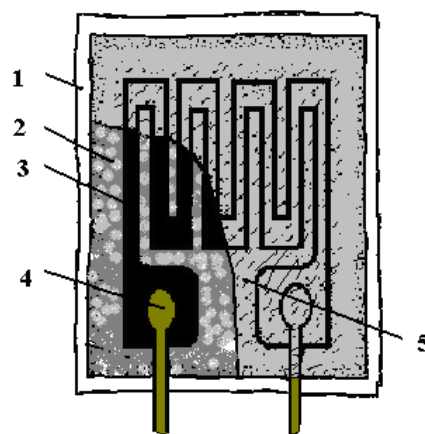


Рис 1. Конструкция пленочного тензорезистора:
1 – исследуемая деталь, 2 – изолятор подложка,
3 – чувствительный элемент (ЧЭ),
4 – узел пайки (сварки) выводного проводника;
5 – защитный слой

Отводящие проводники из проволоочного никрома диаметром 0,2 мм в стекло – органической изоляции, закреплялись контактной электросваркой на детали (градуировочной балке) с помощью хому-

тиков из жаропрочной фольги. Подсоединение отводящих проводников к плёнкам проводилось способом выжигания электропроводящей пасты в зоне контакта.

Технология создания и закрепления ВПТ на исследуемой детали представлена в работах [1, 2].

В предлагаемой статье приводятся результаты исследования характеристик рассматриваемых выше ВПТ.

Исследованию подлежали:

- статическая характеристика преобразования при нормальной температуре – $\xi (\varepsilon)$;
- чувствительность при нормальной температуре – K ;
- функция влияния температуры на чувствительность – $\Phi (T)$;
- температурная характеристика сопротивления $\xi (T)$;
- относительная поперечная чувствительность при нормальной температуре – K_{Π} ;
- сопротивление изоляции в рабочей области значений температуры – $R_{из}$.

Результаты исследования

Для исследования статической характеристики преобразования при нормальной температуре, а также чувствительности при нормальной температуре и функции влияния температуры на чувствительность использовалась созданная высокотемпературная установка, не имеющая аналогов. Разработана методика, позволяющая проводить исследования ВПТ при условии неравномерного прогрева упругого элемента градуировочной установки, схема которой представлена на рис. 2.

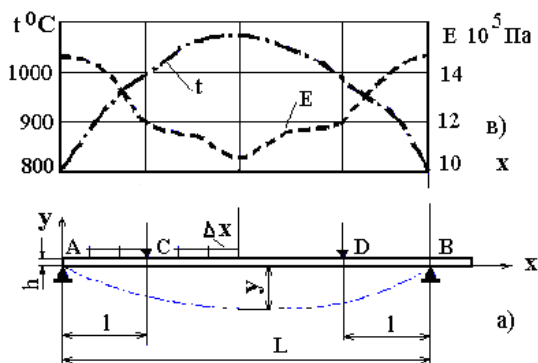


Рис. 2. Схема устройства для тарировки тензорезисторов (а) и образец распределения температуры t , модуля упругости E по длине балки (в)

При определении статической характеристики преобразования ВПТ, функции влияния, температу-

ры на чувствительность и температурной характеристики тензорезисторов их подключение в измерительную цепь проводилось нами по четырехпроводной, потенциметрической схеме (рис. 3). Питание на тензорезистор подавалось от аккумуляторной батареи 2 с регистрацией проходящего тока миллиамперметром 3 (типа М-253, класс точности 0,5). Компенсация температурного влияния на сопротивление тензорезистора осуществлялась с помощью стабилизирующего источника напряжения 4 типа ИРН-64, питаемого от аккумуляторной батареи 5. Напряжение компенсации температурной составляющей сопротивления тензорезистора измерялось с помощью цифрового вольтметра 6 типа Ц1312 (класс точности 0,2). Регистрация сигнала тензорезистора (изменения напряжения на чувствительном элементе) проводилась через аналого-цифровой преобразователь 7, в роли которого выступал персональный компьютер со специализированным программным обеспечением [3].

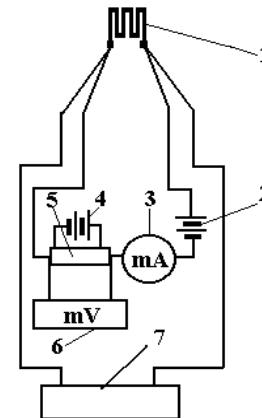


Рис. 3. Потенциметрическая схема подключения ВПТ при лабораторных исследованиях

Деформирование градуировочной балки с тензорезисторами проводилось нами в установке (см. рис. 2), а нагрев образцов с тензорезисторами при определении их температурных характеристик проводилось в муфельной печи. Измерение прогиба градуировочной балки осуществлялось с помощью катетометра КМ-8.

Результаты проведенных нами исследований характеристик ВПТ приведены на рис. 4, 5 и 6 и представлены в табл. 1. Их сравнительный анализ показывает, что плёночный ЧЭ из платины тип I имеет максимальное значение чувствительности ($K=4,2$) при нормальной температуре, однако такие характеристики, как статическая и функция влияния температуры на чувствительность тензорезисторов не отличаются стабильностью. Это связано с влиянием шероховатости изолятора – подложки, которая у различных тензорезисторов различна, что в свою

очередь влияет на значение удельного сопротивления его пленочного ЧЭ.

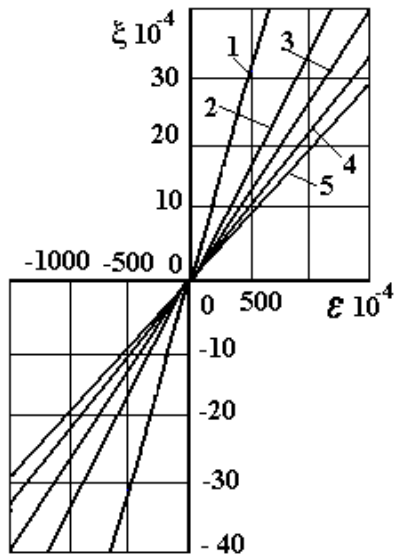


Рис. 4. Статическая характеристика преобразования ВПТ с ЧЭ:

- 1 – платина (тип – 1); 2 – платина (тип – 2);
- 3 – платина-керамика; 4 – платина-родий (70x30);
- 5 – платина-палладий (50x50)

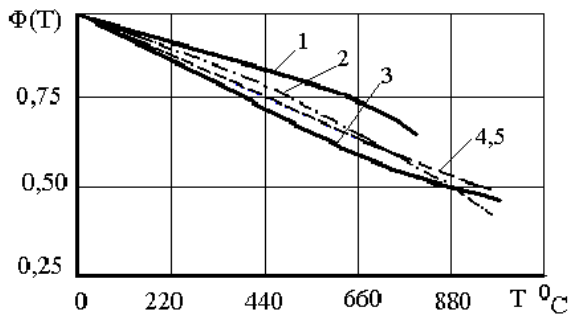


Рис. 5. Функция влияния температуры на чувствительность ВПТ:

- 1 – платина (тип – 1); 2 – платина (тип – 2);
- 3 – платина-керамика; 4 – платина-родий (70x30);
- 5 – платина-палладий (50x50)

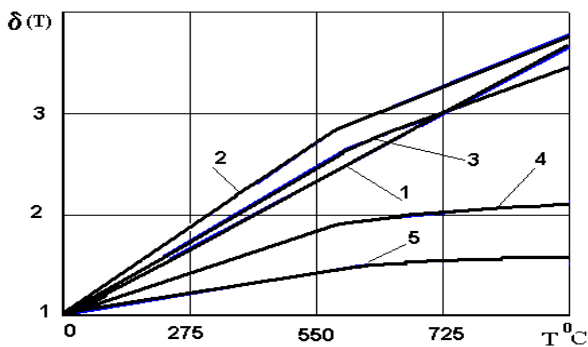


Рис. 6. Температурная характеристика сопротивления ВПТ с ЧЭ:

- 1 – платина (тип – 1); 2 – платина (тип – 2);
- 3 – платина-керамика; 4 – платина-родий (70x30);
- 5 – платина-палладий (50x50)

Основным недостатком тензорезисторов с ЧЭ из платины тип 2 является низкое значение сопротивления при нормальной температуре.

Чувствительные элементы из сплавов: платина - палладий и платина - родий имеют температурную характеристику на порядок более низкую, чем у остальных типов рассматриваемых тензорезисторов.

Тензорезисторы с платино – керамическими ЧЭ отличаются стабильностью основных характеристик. Величины их сопротивлений при нормальной температуре могут изменяться в широком интервале, что позволяет изготавливать их с малой базой.

Коэффициент поперечной тензочувствительности как правило зависит от конструктивного исполнения решётки чувствительного элемента тензорезистора, а также от вида материала, из которого выполнен ЧЭ. Указанное вредное для измерений деформаций явление характерно для всех типов тензорезисторов (проволочных, фольговых), однако, наиболее ярко проявляется у плёночных.

Для исследования поперечной чувствительности предложенных нами ВПТ были препарированы специальные призматические образцы толщиной 6 мм, на которых для контроля методики эксперимента помимо исследуемых ВПТ закреплялись стандартные проволочные тензорезисторы типа ПКБ-10-200.

Под действием силы сжатия (рис.7) перпендикулярной главной оси ВПТ, последний воспринимает деформацию растяжения, связанную с величиной коэффициента Пуассона материала образца. Вместе с тем плёнка чувствительного элемента тензорезистора испытывает сжатие в поперечном направлении (поперечная тензочувствительность), которое приводит к уменьшению сопротивления ВПТ на величину – ΔR_{\perp} .

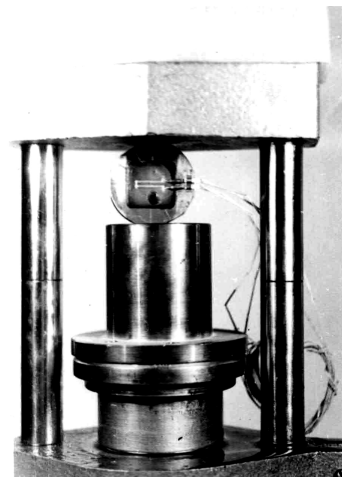


Рис. 7. Общий вид установки для исследования поперечной чувствительности ВПТ

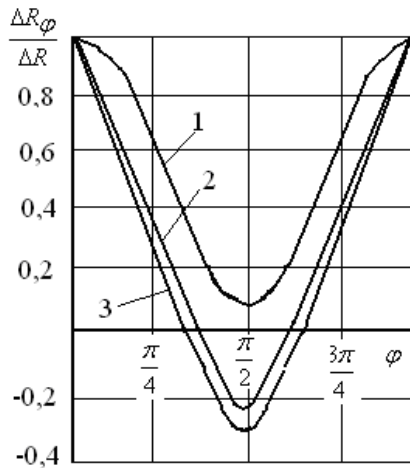


Рис. 8. Угловая характеристика тензорезисторов:
 1- ЧЭ – платина (тип-1); 2- ЧЭ платина (тип-2);
 3 – тензорезистор типа ПКБ-10-200

Величина ΔR_{Π} зависит от геометрии чувствительного элемента, а именно от ширины плёнки последнего. По результатам проведенных опытов для ВПТ с чувствительным элементом из пластины тип 1 величина ΔR_{Π} составляет 37%, а из пластины тип 2 и композиции платина-керамика на порядок меньше – 3,5%. Для контрольного проволочного тензорезистора типа ПКБ-10-200 указанная величина оказалась равной 0,01, что хорошо согласуется с его паспортными данными. Высокая поперечная чувствительность ВПТ (пластины тип 1), связана с геометрическими размерами и особенностями физического строения тонкой плёнки платины.

Проведенные исследования по сопротивлению тепловому удару, механической и эрозионной стойкости ВПТ показали, что все рассмотренные типы тензорезисторов выдерживают без разрушения 20-30 теплосмен - нагрев до 1000⁰С и охлаждение в воде.

Тензорезисторы с пленками платины тип-2 и платина-керамика надежно работают при значительных механических растягивающих усилиях. Последнее доказано, например, испытаниями турбинной лопатки турбокомпрессора АИ-450 при числах оборотов ротора до 57000 обр/мин.

Заключение

Таким образом, проведенные нами исследования позволили сделать вывод, что ВПТ с чувствительными элементами на основе платины, ее сплавов и композиций, имеют характеристики, удовлетворяющие, в большинстве случаев, требованиям определения вибронапряжений конструкций в условиях работы ГТУ. При этом преимущество имеют тензорезисторы с чувствительными элементами, выполненными из пленки платины тип-2 и композиции платина-керамика, так как указанные типы тензорезисторов обладают стабильными характеристиками, значительной механической стойкостью. Тензорезисторы с чувствительными элементами из сплавов платина-палладий и платина-родий позволяют, за счет изменения процентного содержания в сплавах палладия и родия, при необходимости в широком диапазоне, изменять и температурные характеристики.

Поперечная чувствительность толстоплёночных ВПТ достаточно близка к чувствительности серийного проволочного и может быть ещё более уменьшена за счёт совершенствования его конструкции.

Рассмотренные в статье материалы были представлены в виде доклада на «11th Conference of Iranian Aerospace Society AERO 2012», Tehran, Iran и получили одобрение [4].

Таблица 1

Характеристики ВПТ

№ п/п	ЧЭ тензорезистора (ВПТ)	Изолятор – подложка	Рабочая темп-ра, max °С	Коеф. тезочувствительности, темп-ра 20 °С	ξ при ε – о.е.д.	темп-ра 550 °С Φ(Т) темп-ра 880 °С	δ(Т) темп-ра 550 °С
1	Платина /тип – 1/	Эмаль – 103-4	850	4,2	0,040	0,547	2,49
2	Платина /тип – 2/	ЭВК – 14	950	2,15	0,018	0,465	
3	Платина – керамика	Цемент фосфатного твердения	1000-1050	1,80	0,016	0,500	2,67
4	Платина-палладий /50x50/	Цемент фосфатного твердения	1000-1050	1,80	0,026	0,687	0,645
5	Платина-родий	Цемент фосфатного твердения	1000-1050	1,80	0,031	0,576	1,04

Литература

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

2. Пленочный тензорезистор для виброиспытаний лопаток турбин ГТД [Текст] / Ю.А. Гусев, К. Кахраи, Д.Ф. Симбирский, СС. Трипольский // *Авиационно-космическая техника и технология*. -2012.- №8 (95). - С. 169-172.

3. Зотов, А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния поршня [Текст] / А.А. Зотов // *Авиационно-космическая техника и технология*. -2003. - №42/7. - С. 165-167.

4. Kahrai, K. A High-temperature film strain gauge for the research of the vibratory stress condition of GTE turbine blades ГТД [Text] / К. Kahrai //11th Conference of Iranian Aerospace Society AERO 2012 Aerospace Engineering Department, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology 20-22 February 2012, Tehran, Iran. - P. 176.

Поступила в редакцию: 18.03.2013, рассмотрена на редколлегии 24.04.2013

Рецензент: д-р техн. наук, технический консультант ОАО «АВТРАМАТ» А.В. Белогуб, Харьков.

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ ПЛІВКОВИЙ ТЕНЗОРЕЗИСТОР І ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Камбіз Кахраї

Наведено умови, при яких проводяться дослідження вібронапруженого стану лопаток турбін ГТД із застосуванням тензорезисторів. Розглядаються тензорезистори з плівковим чутливим елементом на основі металокераміки і ізолятором підкладкою з високотемпературного цементу фосфатного твердіння. Розглядаються установки і методика проведення експериментальних досліджень основних характеристик плівкових тензорезисторів. Досліджуються такі характеристики плівкового тензорезистора, як статична характеристика перетворення при нормальній температурі, функція впливу температури на чутливість, температурна характеристика опору, відносна поперечна чутливість при нормальній температурі, ізоляції в робочій області значень температури, а також дослідження його на термоциклічну міцність, на термоудар. Відзначено позитивні особливості застосування високотемпературних плівкових тензорезисторів не дивлячись на складність технології їх нанесення на лопатку.

Ключові слова: тензорезистор, чутливий елемент, ізолятор-сполучне, статична характеристика, статична і температурна характеристики, поперечна чутливість, газотурбінна установка.

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

Kambiz Kahrai

The vibratory stress state research conditions of GTE turbine blades using resistive-strain sensors are presented. The resistive-strain sensors with ceramic-metal-based film sensor and insulator – the padding made of high temperature phosphate hardening cement are considered. The experimental plant and experimental research methodology of film resistive-strain sensors main performances are considered. Such performances of film resistive-strain sensor as static characteristic on normal temperature, sensitivity function, resistant temperature performance, specific transverse strain gage length on normal insulation temperature in nominal temperature range of use are examined. The thermocyclic strength examination and thermal shock tests of the film resistive-strain sensor were carried out. Positive features of high temperature film resistive-strain sensors utilization are mentioned despite of blade coating technology complicacy.

Key words: resistive-strain sensor, sensing element, insulator-binder, static characteristic, temperature performance, transverse strain gage length.

Кахраи Камбіз – аспірант кафедри конструкцій авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харьков, Україна.