

УДК 531.781.2

Ю. А. ГУСЕВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПЛЕНОЧНЫЙ ТЕНЗОРЕЗИСТОР**

Приведены условия, при которых проводятся исследования вибронпряженного состояния лопаток турбин ГТД с применением тензорезисторов. Представлена конструкция высокотемпературного тензорезистора с пленочным чувствительным элементом на основе платины и металлокерамики и изолятором подложкой из высокотемпературного покрытия фосфатного твердения. Отмечается повышенная вибропрочность пленочных тензорезисторов, разработанных в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Приведены результаты исследования структуры элементов высокотемпературного пленочного тензорезистора с помощью электронного микроскопа. Проведены исследование структуры изолятора – подложки на основе керамики связующего фосфатного твердения. Определена стеклофаза высокотемпературного покрытия с включениями оксида алюминия, повышающими электро - изоляционные свойства тензорезистора. Выявлена значительная пористость покрытия. Высказываются предположения о наличии промежуточного слоя между покрытием и металлом детали.

Представлена структура пленочного чувствительного элемента, сформированная из металлических частиц размером 4,26 – 5,05 нм.

Ключевые слова: тензорезистор, чувствительный элемент, изолятор подложка, стеклофаза, конгломератная структура, коэффициент тензочувствительности

Введение

Рабочие лопатки турбин газотурбинных двигателей (ГТД) испытывают воздействие высокоскоростных (до 600 м/с) и химически агрессивных газовых потоков с температурой до 1300-1500⁰С, что приводит к значительным механическим нагрузкам и эрозийным явлениям. Высокие обороты роторов вызывают предельно высокие растягивающие напряжения от центробежных сил. Так у современных малоразмерных ГТД частоты вращения турбокомпрессора (ТК) могут составлять 57000 об/мин и более.

Для исследования вибронпряженного состояния лопаток турбин применяются высокотемпературные проволочные и пленочные тензорезисторы.

Созданные в Харьковском национальном аэрокосмическом университете высокотемпературные пленочные тензорезисторы (ВПТ) отличаются повышенной вибростойкостью при температуре 1000⁰С. Конструктивно рассматриваемый ВПТ представлен на рисунке 1.

Чувствительный элемент (ЧЭ) ВПТ выполнен в виде пленки, состоящей из композиции металлов платиновой группы таких, как платина, палладий и родий толщиной 50 - 75 мкм. Для повышения удельного сопротивления пленки ЧЭ в ее состав вводится керамическая составляющая. Пленка получается методом вжигания в изолятор - подложку специальной металлизированной пасты.

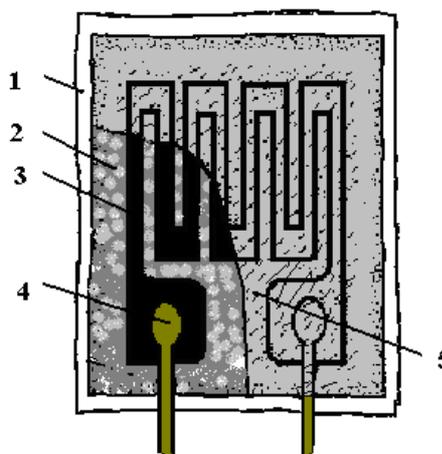


Рис. 1. Конструкция пленочного тензорезистора: 1 – исследуемая деталь; 2 – изолятор - подложка; 3 – чувствительный элемент (ЧЭ); 4 – узел пайки (сварки) выводного проводника; 5 – защитный слой

Состав металлокерамической пасты в весовых процентах: мелкодисперсный порошок платины – 20; порошок палладия – 20; диоксид кремния – 10; окись алюминия – 10; оксид бора – 3; оксид кальция – 3; органическое связующее – 34. Представленные оксиды формируют керамическую составляющую пленки ЧЭ. Проведенные исследования позволили отдать предпочтение металлокерамической пленке платины и платины – палладия [1].

Режим температурной обработки (вжигание) пленки ЧЭ в слой изолятора - подложки представлен на рисунке 2.

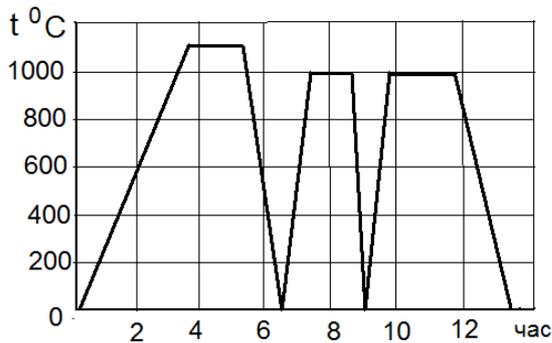


Рис. 2. Режим температурной обработки металлокерамической пасты ЧЭ

Отводящие проводники из платины диаметром 50 мкм подсоединялись к ЧЭ способом вжигания электропроводящей пасты. Отводящие проводники из проволочного нихрома диаметром 0,2 мм в стекло – органической изоляции соединены с платиновой проволокой электросваркой.

Изолятор – подложка, толщиной от 60 до 100 мкм, представляет собой покрытие, содержащее в весовых процентах: диоксид кремния 10 - 30; гидроксид алюминия 3 - 15; оксид алюминия 15 - 28; оксид бора 1 - 4; оксид кальция 1 - 3; оксид бария 1,5 - 3,5; оксид хрома 1,0 - 5,0; оксид титана 0,5 - 3,0; оксид магния 0,5 - 1,2; алюмофосфатное связующее (АФС) – остальное. Сопротивление электрической изоляции изоляторов – подложек при максимальной температуре работы тензорезисторов была не менее 0,05 - 0,1 МОм.

После нанесения покрытия на поверхность детали оно подвергается сушке при температуре 300 °С. Высокотемпературная обработка покрытия происходит при нагреве металлокерамической пасты ЧЭ тензорезистора (см. рис. 2).

Рассматриваемые тензорезисторы применялись при исследовании вибронпряженного состояния лопаток турбин таких двигателей, как ТВ3-117, Д-36, Д-18 и АИ-450. На рисунке 3 представлены лопатки турбин двигателей АИ-450 и Д-36 [1, 2].

Вибропрочность рассматриваемого тензорезистора в значительной мере зависит от свойств его изолятор - подложки.

Главным свойством материала покрытий изолятора – подложки является минимальное термическое напряжение в процессе эксплуатации во всем интервале изменения температур. Оно зависит от состава керамических материалов, температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) которых максимально приближались бы к таковым ме-

талла детали, на которую наносится покрытие.

ТКЛР металлов, применяемых в двигателестроении, изменяется в весьма широких пределах - от $\approx 5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ для сплавов на основе титана, и до $\approx 14 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, значениями которых обладают жаропрочные сплавы на основе никеля

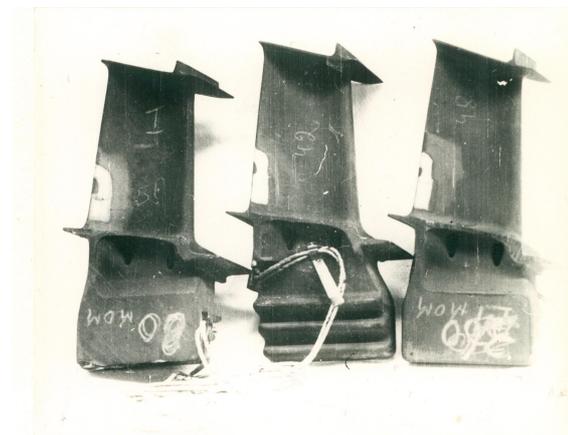
Необходимо отметить, что материал изолятор - подложки тензорезистора относится к теплозащитным керамическим покрытиям.

Основные направления развития работ по созданию теплозащитных керамических покрытий для авиационных ГТД были сформулированы в конце 80-х годов прошлого столетия. Значительный вклад в создании безобжиговых покрытий на основе фосфатных связующих принадлежит В. Е. Ведю [3].

Для определения причин повышенной вибропрочности тензорезистора были проведены исследования, с помощью электронного микроскопа, структур его основных составляющих элементов, а именно, керамического покрытия на основе фосфатного связующего и металлокерамической пленки ЧЭ.



а



б

Рис. 3. Общий вид лопаток турбины препарированных пленочными тензорезисторами: а – АИ-450; б – Д-36

Результаты исследования

Для проведения исследования был выполнен микрошлиф лопатки турбины ТК двигателя АИ-450 с закрепленным на ней пленочным тензорезистором. При изготовлении микрошлифа возникли трудности, связанные с хрупкостью материала изолятора подложки при комнатной температуре.

Поверхностный снимок элементов тензорезистора: изолятор – подложки, пленки ЧЭ представлен на рисунке 4.

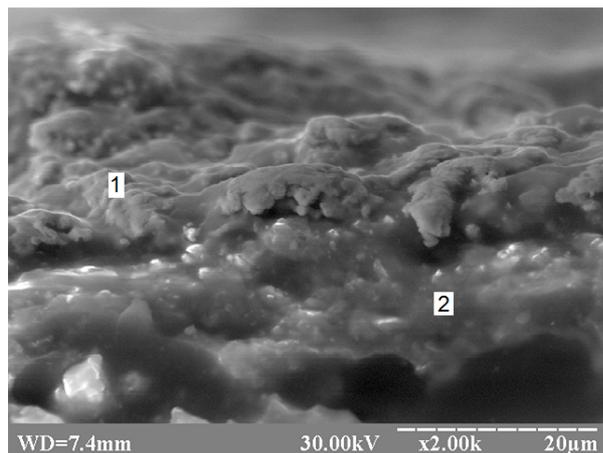


Рис. 4. Поверхность тензорезистора:
1 – поверхность пленки платины ЧЭ;
2 – изолятор – подложка, жаростойкое покрытие

Исследование изолятор – подложки.

Покрытие предлагаемого состава обеспечивает продолжительную работу в потоке газа с температурой 1490 °С, что объясняется наличием в покрытии стеклофазы. Стеклофаза рассматривается как уплотняющий клей в условиях экстремального повышения вязкости разрушения.

Исследования высокотемпературного покрытия, содержащего стеклофазу, показывают на аномальное повышение прочности и вязкости разрушения. Это явление получило название пика прочности. Наблюдавшиеся явления увеличения прочности керамики, содержащей стеклофазу, объясняют скруглением кончика трещин - "тупления" трещины. Это свойство покрытия со стеклофазой приводит к значительной его прочности [3, 4].

На рисунке 5 представлено изображение изолятора – подложки с ярко выраженной стеклофазой. Высокотемпературное стекло покрытия формируется из оксидов, входящих в его состав при высокотемпературном обжиге. При изготовлении ВПТ на турбинной лопатке из ЖС6-К температура обжига не превышала 1050 °С, время выдержки при этой температуре не более 50 - 60 минут. На изображении стеклообразного покрытия видны мелкодисперсные белые включения оксида алюминия. Являясь наполнителем

в стеклофазе, он способствует сохранению высоких электроизоляционных свойств покрытия - важному параметру высокотемпературного тензорезистора.

Изображение (см. рис. 5) показывает на высокую пористость покрытия, которая может быть уменьшена за счет увеличения температуры и времени выдержки при обжиге. Однако более высокая температура и длительный нагрев может повлиять на прочностные характеристики материала лопатки турбины, что недопустимо.

Выявлена промежуточная зона между жаростойким покрытием и материалом детали - рисунок 6. Возможно, именно эта зона обеспечивает вибропрочность ВПТР в процессе исследования вибронпряжений в лопатках турбин ГТД. Химический состав промежуточного слоя определить не удалось.

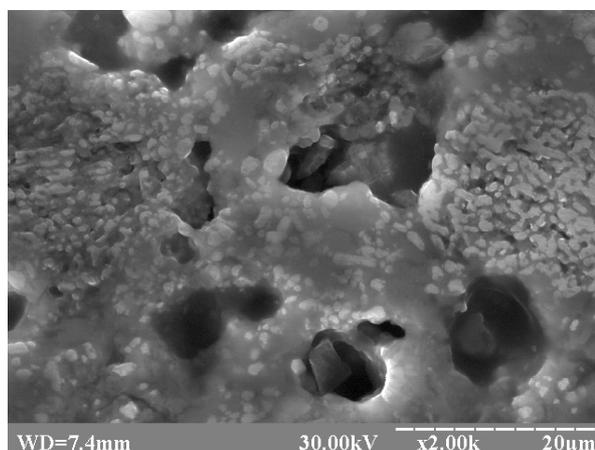


Рис. 5. Стеклофаза высокотемпературного покрытия с включениями оксида алюминия

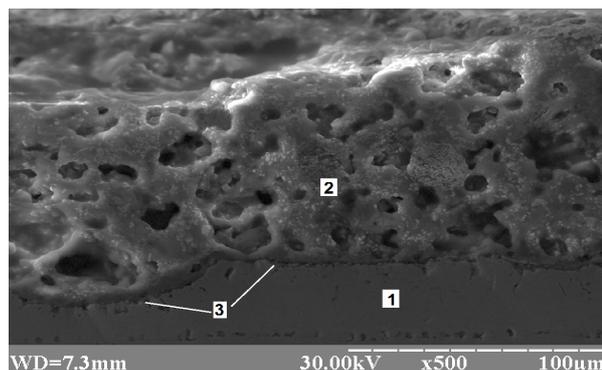


Рис. 6. Срез покрытия и металла:
1 – металл детали ; 2 – изолятор – подложка (жаростойкое покрытие); 3 - промежуточная зона между жаростойким покрытием и материалом детали

Исследование пленки чувствительного элемента тензорезистора.

Как уже указывалось ранее, пленка ЧЭ тензорезистора представляет отдельные металлические частицы, соединяющиеся между собой при температур-

ной обработке (см. рис. 2). В процессе высокотемпературного нагрева происходит спекание отдельных металлических частиц в однородную массу, которая не обладает свойствами сплошного металла.

На рисунке 7 представлена спеченная масса порошка платинового ЧЭ тензорезистора, представляющая собой конгломератную структуру. Размеры отдельных частиц платины, полученные с помощью электронного микроскопа составили 4,26 – 5,05 нм.

Темные области на рис. 7 представляют собой керамическую стеклообразную составляющую ЧЭ, которая позволяет создавать металлокерамические пленки с необходимым удельным электрическим сопротивлением.

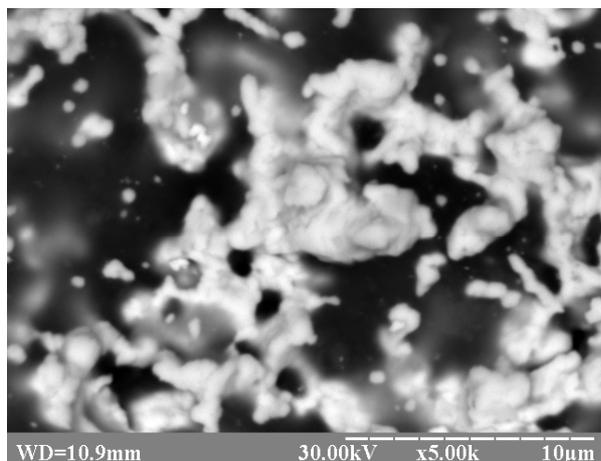


Рис 7. Структура пленки платины чувствительного элемента тензорезистора

Исследования показали, что коэффициент тензочувствительности металлических пленок с подобной структурой не зависит от вида металла и составляет 1,8 - 2,2. Этот факт говорит о том, что на тензочувствительность таких пленок влияет лишь диффузионная связь отдельных металлических частиц, образующих конгломератную структуру, которая отличается от электронной структуры сплошного металла. В качестве примера приведем: - коэффициент тензочувствительности металлической платины составляет 5,5, а пленочной, полученной по вышеописанной технологии 1,8 - 2,1. Проволочный никель имеет тензочувствительность 11, а та же чувствительность никелевой пленки, полученная вакуумным напылением, составляет 1,8 - 2. При растяжении пленочного ЧЭ тензорезистора происходит просто нарушение диффузионных связей отдельных металлических частиц. Структура пленки платины (см. рис. 7) подтверждает сказанное выше.

Стеклофаза, входящая в структуру пленочного ЧЭ, за счет своих упругих свойств, поддерживает стабильность диффузионных связей конгломератной структуры пленки ЧЭ.

С повышением температуры до 950 - 1000 °С упругие свойства стеклофазы уменьшаются, что приводит к падению коэффициента тензочувствительности рассматриваемых пленочных тензорезисторов от 1,8 - 2 до 0,7 - 0,8 единиц.

Заключение

Таким образом, проведенные нами исследования позволили сделать вывод о том, что вибропрочность пленочного тензорезистора разработки ХАИ определяются механическими свойствами изолятора - подложки, представляющего собой жаростойкое покрытие, надежно закрепляемое на поверхности детали из жаропрочных сплавов типа ЖС6 К.

Пленочный ЧЭ тензорезистора, выполненный из металлов платиновой группы, обеспечивает стабильное измерение относительной деформации исследуемой детали до температур 950 – 1050 °С за счет отсутствия процесса окисления исходных металлов ЧЭ.

Литература

1. А.с. 877321 СССР, МКИ 3 g 01 B 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. – № 2707208/25-28 ; Заявл. 26.01.78 ; опублик. 30.10.81, Бюл. № 40. – 1 с. : ил.

2. Исследования вибронпряженного состояния элементов ГТД с применением высокотемпературных пленочных тензорезисторов [Текст] / Ю. А. Гусев, Камбиз Кахраи, Г. А. Прочан и др. // Вісник НТУ «ХПІ» : зб. наук. праць. Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – Вып. 1. – С. 38-43.

3. Свойства жаростойких покрытий лопаток турбин ГТД [Текст] / В. Е. Ведь, Ю. А. Гусев, Н. И. Гусева и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 8 (95). – С. 169-172.

4. Davidge, R. W. The strength of ceramics [Text] / R. W. Davidge, A. G. Evans // Materials Science and Engineering. – 1970. – Vol. 6. – P. 281-298.

References

1. Gusev, Ju. A., Simbirskij, D. F., Ved', V. E., Jalovenko, V. Ja., Reznichenko, M. N., Frolov, V. M. *Vysokotemperaturnyj tenzodatchik i sposob ego izgotovlenija* [High-temperature strain gage and its manufacturing method]. A.s. 877321 SSSR, № 2707208/25-28.

2. Gusev, Ju. A., Kahrai Kambiz, Prochan, G. A. *Issledovanija vibronaprjazhennogo sostojanija jelementov GTD s primeneniem vysokotemperaturnyh plenocnyh tenzorezistorov* [Investigations of the vibratory stressed state of GTE elements using high-

temperature film strain gages]. *Vestnik NTU «HPI»*, 2015, no. 1, pp. 38-43.

3. Ved', V. E., Gusev, Ju. A., Guseva, N. I. Svoystva zharostojkikh pokrytij lopatok turbin GTD [Properties of heat-resistant coatings of GTE turbine

blades]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2012, no. 8 (95), pp. 169-172.

4. Davidge, R. W., Evans, A. G. The strength of ceramics. *Materials Science and Engineering*, 1970, vol. 6, pp. 281-298.

Поступила в редакцию 12.05.2017, рассмотрена на редколлегии 12.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Интегрированные технологии процессы и аппараты» В. Е. Ведь, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ ПЛІВКОВИЙ ТЕНЗОРЕЗИСТОР

Ю. О. Гусев

Наведено умови, при яких проводяться дослідження вібронапруженого стану лопаток турбін ГТД із застосуванням тензорезисторів. Представлена конструкція високотемпературного тензорезистора з плівковим чутливим елементом на основі платини і металокераміки і ізолятором - підкладкою з високотемпературного покриття фосфатного твердіння. Відзначається підвищена вібропрочність плівкових тензорезисторів розроблених в Національному аерокосмічному університеті ім. М. С. Жуковського «ХАІ». Наведено результати дослідження структури елементів високотемпературного плівкового тензорезистора за допомогою електронного мікроскопа. Проведено дослідження структури ізолятора - підкладки на основі кераміки сполучного фосфатного твердіння. Визначено склофаза високотемпературного покриття з включеннями оксиду алюмінію, що підвищують електро-ізоляційні властивості тензорезистора. Виявлена значна пористість покриття. Висловлюється припущення про наявність проміжного шару між покриттям та металом деталі. Представлена структура плівкового чутливого елемента, сформована з металевих частинок розміром 4,26 - 5,05 нм.

Ключові слова: тензорезистор, чутливий елемент, ізолятор - підкладка, склофаза, конгломератна структура, коефіцієнт тензочутливості

HIGH-TEMPERATURE FILM STRAIN GAUGE

Yu. A. Gusev

The conditions under which the vibratory stressed state of the GTE turbine blades are investigated with the use of strain gauges are given. The construction of a high-temperature strain gage with a film sensitive element based on platinum and cermet and insulator-base from high-temperature cement of phosphate hardening is presented. There is an increased vibration resistance of film strain gages, developed at the National Aerospace University. "KhAI". The results of an electron microscope study of the elements structure of a high-temperature film strain gauges are presented. The structure of the insulator-base on the basis of the phosphate hardening binder ceramic was studied. The glass phase of the high-temperature coating with alumina inclusions, which increases the electroinsulating properties of the strain gage, was determined. Significant porosity of the coating was revealed. It is suggested that there is an intermediate layer between the coating and the metal of the part. The structure of the film sensitive element, formed of metal particles of 4.26-0.055 nm, is presented.

Keywords: strain gage, sensing element, insulator-binder, glass phase, conglomerate structure, coefficient of strain-sensitivity

Гусев Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, профессор кафедры конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Gusev Yuriy Alekseevich – PhD, professor of aircraft engine department of National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: aedlab@gmail.com.