

УДК 531. 781. 2

Ю.А. ГУСЕВ, А.В. ШЕРЕМЕТЬЕВ, Н.М. ЗАЛУНИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» Украина

ПЛЕНОЧНЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассмотрены вопросы технологии изготовления, и исследования характеристик высокотемпературных тезорезисторов для оценки вибронпряженного состояния лопаток газовых турбин.

Чувствительный элемент, электроизолирующая подложка, связующее, бандажная полка, замок лопатки, корневое сечение лопатки, нихромовая микропроволока, термообработка

Рабочие лопатки турбин, для обеспечения динамической прочности современных авиационных ГТД, на периферийном сечении соединяются бандажными полками (при обеспечении нулевого зазора между полками в рабочем состоянии). Такое бандажирование рабочих лопаток может быть выполнено попарно либо в колесе в целом. Стык между полками лопаток может быть выполнен зигзагообразным и под углом к оси ротора (рис. 1), в этом случае у «длинных» и «витых» лопаток деформация кручения от действия газовых сил, поддерживает этот зазор равным нулю.

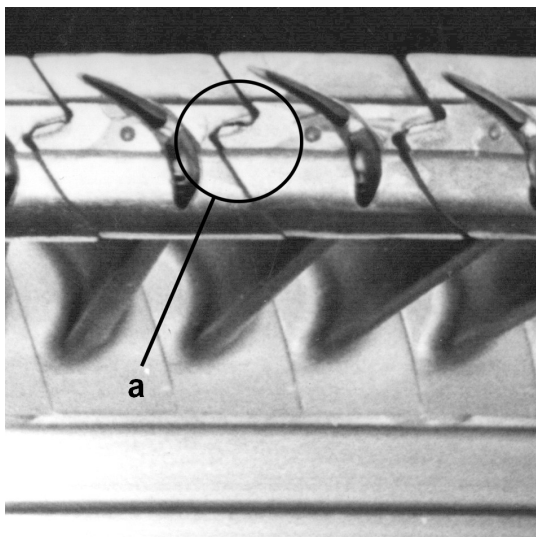


Рис. 1. Бандажирование лопаток турбин типа «зига»; а – зона износа контактных поверхностей сопряженных лопаток

С наработкой ресурса двигателем происходит уменьшение монтажного натяга из-за износа торцов

бандажных полок лопаток (рис. 1). При этом величина динамических напряжений в лопатках изменяется, так как происходит уменьшение контактных напряжений и увеличение сил трения в зоне их сопряжения.

Исследование процесса взаимодействия рабочих лопаток в зоне бандажных полок является актуальным, так как затрагивает вопрос обеспечения их работоспособности в течение требуемого ресурса двигателя. Особенно важно такое исследование для рабочих лопаток последних ступеней турбин авиационных ГТД (турбина вентилятора), низкие формы собственных частот колебаний, которых близки к рабочему диапазону двигателя.

Для исследования вибронпряженного состояния лопаток турбин применяются высокотемпературные тезорезисторы.

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 (до 300 с⁻¹) вызывают предельно высокие растягивающие напряжения от центробежных сил.

В современной высокотемпературной вибротензометрии при прочностных исследованиях деталей авиационных двигателей, широко используются высокотемпературные тезорезисторы с чувстви-

тельными элементами из нихромовой микропровода [1]. Основным недостатком этих датчиков – сравнительно низкий ресурс работы при температуре 900 – 1000 °С и динамических относительных деформациях порядка $500 \cdot 10^{-6}$.

С 1972 года в Харьковском авиационном институте проводились работы по созданию и применению высокотемпературных пленочных тензорезисторов [2], которые отличались повышенной вибростойкостью и стабильностью характеристик при температурах до 1000 °С. В тоже время применение в качестве чувствительного элемента материала платины, приводило к повышенной температурной чувствительности пленочных тензорезисторов, что в свою очередь усложняло расшифровку результатов эксперимента и требовало применение специальных измерительных схем.

Нами, предлагаются пленочные чувствительные элементы тензорезисторов, с пониженной чувствительностью к изменению температуры и использующие платино-палладиевые сплавы с различным процентным содержанием выше указанных металлов.

В качестве связующего, т.е. электроизолирующей подложки, пленочного тензорезистора, ранее использовался цемент фосфатного твердения, имеющий коэффициент линейного расширения близкий к аналогичному параметру материала лопатки турбины.

Применение новых жаропрочных сплавов, позволяющих отливать лопатки турбин с направленной кристаллизацией, требует проведения дополнительных исследований в области создания новых связующих, имеющих соответствующий коэффициент линейного расширения.

Технология создания и закрепления пленочного тензорезистора на лопатке турбины включает в себя следующие этапы:

- определение мест расположения тензорезистора на поверхности пера лопатки турбины;
- получение специальной, резистивной пасты;

- нанесение на лопатку связующего – электроизолирующей подложки, в месте установки тензометра;

- нанесение резистивной пасты на электроизолирующую подложку и ее термическая обработка;

- подсоединение отводящих проводников к чувствительному элементу тензорезистора и их механическое закрепление на поверхности лопатки.

На предварительно очищенную поверхность лопатки (в месте крепления тензорезистора) наносится слой связующего – цемент фосфатного твердения, термическая обработка которого состоит в медленном нагреве до температуры 300 °С. Таким образом, мы получаем на лопатке электроизолирующую подложку тензорезистора.

Резистивная паста специального состава, включающая коллоидные порошки металлов платины и палладия, наносится на подготовленную подложку с помощью металлического рейсфедера или методом шелкографии через специальные, трафаретные маски, имеющие форму чувствительного элемента тензорезистора. Температурная обработка нанесенной пасты состоит в продолжительной (до 1,5 – 2 часов) сушке до 150 °С и в дальнейшем, кратковременном температурном обжиге при температуре 1000 – 1050 °С.

Подсоединение отводящих проводников к пленке чувствительного элемента, проводится путем вжигания проводника с помощью электропроводной пасты.

Основной характеристикой любого тензорезистора является его тензочувствительность, которая характеризуется соответствующим коэффициентом. Коэффициент тензочувствительности определяется по следующей формуле:

$$K = \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\xi},$$

где K – коэффициент тензочувствительности;

R – электрическое сопротивление чувствительного элемента тензорезистора;

ΔR – приращение электрического сопротивления тензорезистора при восприятии им относительной деформации ξ .

При использовании пленочных тензометров необходимо учитывать, что их коэффициент тензочувствительности зависит от температуры, что влияет на величину выходной сигнала тензорезистора, и следовательно на точность измеряемого вибронапряжения. График, характеризующий зависимость K от температуры представлен на рис. 2.

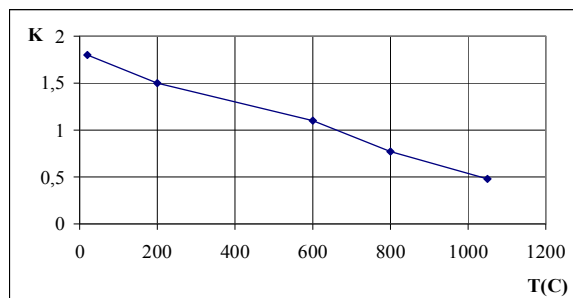


Рис. 2. Зависимость коэффициента тензочувствительности от температуры

Повышение значения K в диапазоне температур 1000 – 1100 °С возможно, при применении более жесткого связующего, не размягчающегося при этих температурах.

Существенным недостатком этих тензорезисторов, является высокая температура вжигания резистивной пасты чувствительного элемента. При этой термообработке нагревается и исследуемая деталь. Препарировка тензорезисторами исследуемой детали не всегда возможна из-за низкой коррозионной стойкости ее материала. Материал лопаток турбин типа ЖС6-К. позволяет осуществлять кратковременные нагревы до 1100 °С без потери прочности. Этот недостаток может быть преодолен при применении пленочных тензорезисторов на автономной подложке [3, 4, 5], создание которых является существенным шагом в расширении области их применения.

Особенность технологии получения тензорезисторов на автономной подложке состоит в том, что резистивная паста чувствительного элемента нано-

сится на специальную, автономную электроизолирующую подложку, и вместе с ней, термически обрабатывается при высоких температурах, а затем подложка закрепляется на исследуемой детали при температурном нагреве не превышающим 300 °С.

Применение новых резистивных паст и фосфатных цемента позволит получить новые тензорезисторы для исследования вибронапряженного состояния лопаток авиационных ГТД.

Литература

1. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие / Под ред. Р.А. Макарова. – Машиностроение, 1975. – 288 с.
2. Исследование характеристик высокотемпературных пленочных тензорезисторов на вибрационной установке применительно к испытаниям в ГТД / Ю.А. Гусев, А.П. Коротаев, С.И. Проненко, В.В. Глебов, Т.В. Гелета // Самолетостроение. Техника воздушного флота. – 1983. – Вып. 50. – С. 27 – 30.
3. Глебов В.В., Гусев Ю.А., Проненко С.И. Пленочные тензорезисторы на автономной подложке для виброиспытаний лопаток ГТД // Экспериментальные методы термочности и диагностики газотурбинных двигателей. – Х.: 1986. – Вып. 3. – С. 145 – 148.
4. Гусев Ю.А., Симбирский Д.Ф., Белогуб А.В., Зотов А.А. Тензорезисторы для оценки напряженно-деформированного состояния поршня двигателя внутреннего сгорания // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2002. – Вып. 34. – С. 185 – 187.
5. А.с. 877321 (СССР) Высокотемпературный тензодатчик и способ его изготовления / Ю.А. Гусев, Д.Ф. Симбирский, В.Е. Вельд и др. – Опубл. в БИ, 1981, № 40. – С. 76.

Поступила в редакцию 28.05.2004

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, ИПМаш НАН Украины, Харьков.