

УДК 531.781.2

Ю.А. ГУСЕВ, А.В. БЕЛОГУБ, КАМБИЗ КАХРАИ

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

АНАЛИЗ ПЕРЕДАЧИ ДЕФОРМАЦИИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ПЛЕНОЧНОМ ТЕНЗОРЕЗИСТОРЕ

Рассмотрены основы передачи измеряемой деформации чувствительному элементу тензорезистора и преобразования ее в приращение его электрического сигнала. Приведена методика исследования передачи деформации в тензорезисторе методом фотоупругости, использующей свойство некоторых материалов двойного лучепреломления при механическом нагружении. Предлагаются результаты экспериментального исследования модели тензорезистора из поликарбоната. Представлены картины изохром при различном нагружении модели тензорезистора. Проведено сравнение результатов экспериментального исследования поляризационным методом с данными расчета нагружения той же модели, полученными методом конечных элементов. Приведены результаты расчета передачи деформации в высокотемпературном пленочном тензорезисторе. Представлен коэффициент передачи деформации модели тензорезистора из поликарбоната, а также соответствующий коэффициент пленочного тензорезистора при различных температурных условиях его работы.

Ключевые слова: тензорезистор, чувствительный элемент, изолятор-подложка, фотоупругость поле изохром, деформация, поликарбонат, полярископ, поляроид.

Введение

При экспериментальном исследовании напряженного состояния деталей машин в настоящее время, в основном применяются тензометры сопротивления или «тензорезисторы». В наиболее сложных условиях находятся тензорезисторы, размещаемые на высоконагретых элементах, например лопаток турбин ГТУ.

Тензорезистор представляет собой проволочный или пленочный чувствительный элемент (ЧЭ), закрепляемый на исследуемой детали связующим, выполняющим также функцию изолятора-подложки рис.1 (а). Изменение электрического сопротивления ЧЭ в следствие деформации поверхности детали является основным регистрируемым сигналом.

Достоверность результатов, получаемых при тензоизмерении, существенно зависит от того, насколько верно передается деформация от поверхности исследуемой детали к ЧЭ тензорезистора через слой изолятора связующего.

Передача деформации в тензорезисторе рассмотрена рядом авторов [1,2,3], по мнению Н.П.Клоковой [4] она характеризуется функцией $\epsilon(x)$, под которой понимается функция распределения деформации $\epsilon_{\text{ч}}$ в ЧЭ по его длине в направлении главной оси тензорезистора при заданной деформации детали, на которой он установлен. Выходной сигнал при деформации ЧЭ тензорезистора пропорционален средней деформации по его длине и определяется по

формуле $\epsilon_{\text{чср}} = \int_0^l \epsilon_{\text{ч}}(x) dx / l_{\text{чэ}}$. Коэффициент передачи деформации определяется как отношение этой средней деформации к измеряемой деформации детали ϵ (в случае градуировки тензорезистора – известная величина), т.е. $K_{\text{пер,ч}} = \epsilon_{\text{чср}} / \epsilon$. Однако расчетные зависимости, приведенные в работах [1,2,3,4], не содержат в явном виде геометрические и упругие параметры конструктивных элементов тензорезистора, что затрудняет расчет истинного коэффициента передачи деформации.

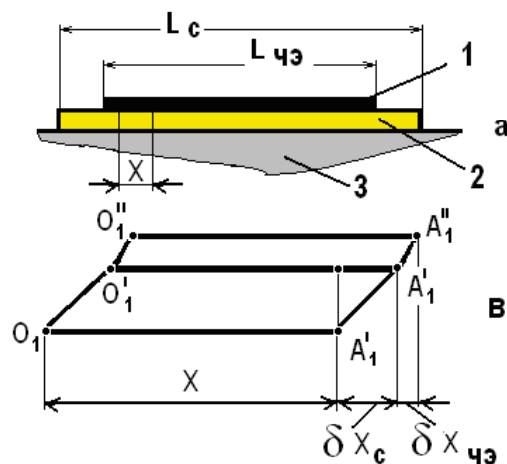


Рис. 1. Схема пленочного тензорезистора:
а) 1 – чувствительный элемент; 2 – изолятор-подложка (связующее); 3 – материал детали;
б) деформации сдвига элемента ВПТ

В предлагаемой работе приводится анализ процесса передачи деформации от исследуемой детали к ЧЭ высокотемпературного пленочного тензорезистора (ВПТ), который отличается повышенной вибростойкостью и работоспособностью при температуре до 1000 °С. ВПТ (см. рис. 1) представляет собой металлокерамическую пленку – ЧЭ с одинаковым по всей длине сечением, расположенную на изоляторе-подложке, которая предварительно наносится на поверхность исследуемой детали [5]. Изолятор-подложка и ЧЭ имеют в своем составе стекловидную фазу, которая до температур 500-550 °С рассматривается, как упруго-деформируемое тело [6], при дальнейшем повышении температуры фосфатное связующее стеклофазы превращается в полимер с амфотерными свойствами [7]. Это позволяет говорить о том, что при температуре 750-950 °С при деформации в слое связующего и ЧЭ возникают только сдвиговые (касательные) напряжения (рис.1 в).

В рассматриваемой работе предлагаются исследования передачи деформации от нагруженной детали к ЧЭ тензорезистора с применением экспериментального поляризационно-оптического метода и расчетного метода конечных элементов (МКЭ).

2. Основы поляризационно-оптического метода

Поляризационно-оптический метод или метод фотоупругости – экспериментальный метод определения напряженного состояния деталей и конструкций на прозрачных моделях из оптически чувствительных материалов [7], основанный на поляризации света и свойстве большинства прозрачных изотропных материалов приобретать под действием нагрузки способность двойного лучепреломления. Материалы, обладающие таким свойством, называют оптически чувствительными.

Для получения поляризованного света применяются специальные установки, использующие отражающие зеркала, поляризационные призмы или поляроидные пленки, называемые поляризатором (рис. 2).

При входе в пластинку, находящуюся в плосконапряженном состоянии (рис.2), поляризованный луч света разлагается на два луча, которые проходят через оптически чувствительный материал с разными скоростями.

Отставание одного луча от другого (линейная разность хода) пропорционально разности коэффициентов преломления n и толщины пластинки d :

$$\delta = d(n_1 - n_2). \quad (1)$$

Оптическая анизотропия среды, показывающая связь между коэффициентами пре-

ломления в точке модели n_1, n_2 , с главными напряжениями σ_1, σ_2 , ($\sigma_1 \geq \sigma_2$), выражается уравнениями 5.2 (в пластинке, нагруженной в основной плоскости, главное напряжение σ_3 , направленное нормально к пластинке, равно нулю).

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= C_1\sigma_1 + C_2\sigma_2, \\ n_2 - n_0 &= C_1\sigma_2 + C_2\sigma_1, \end{aligned} \quad (2)$$

где; n_0 – коэффициент преломления для ненапряженного тела (находящегося в изотропном состоянии);

C_1 и C_2 – оптические коэффициенты, характеризующие для данного материала зависимость между двойным лучепреломлением и напряжениями.

Из уравнений (1) и (2) следует

$$\delta = Cd(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (3)$$

где главные напряжения $\sigma_1 - \sigma_2$ в рассматриваемой точке модели.

Соотношение (5.3) представляет собой основной закон, используемый в поляризационно-оптическом методе (закон Вертгейма), выражающий количественную связь между оптическим эффектом и разностью главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$. Линейную разность хода и направления главных напряжений σ_1 и σ_2 определяют при просвечивании плоской модели в полярископе.

Анализатор – второй поляроид (см. рис. 2), который аналогично поляризатору пропускает световые колебания только в одной плоскости. На выходе из него наблюдается интерференционная картина, образующаяся в результате совмещения в одной плоскости со сдвигом фаз колебаний двух световых волн, выходящих из модели. Интерференционные картины, наблюдаемые на изображении модели, называют картинами полос, или *картинами изохром* (линии с одним уровнем напряжения). Зависимость между напряжениями и порядком полос выражают в

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n \cdot \sigma_0, \quad (4)$$

где σ_0 – оптическая постоянная модели (цена полосы – n), которая зависит от вида оптического материала, толщины модели, длины волны света, применяемого в полярископе [8].

Для количественной оценки напряженно-деформированного состояния модели необходимо определить цену полосы материала σ_0 , из которого она изготовлена. В связи с тем, что свойства материалов изменяются во времени, а иногда они различны и у материалов одной партии, перед каждым экспериментом необходимо проводить тарировку. В основном используется испытание в виде: *диаметрального сжатия плоского диска*.

Из большого числа оптически чувствительных материалов [8] для создания модели тензорезистора, нами выбран поликарбонат, так как он наиболее полно отвечает требованиям, предъявляемым к оптически чувствительным материалам.

Для применения метода фотоупругости и отождествления его с реальной деталью можно воспользоваться элементами теории подобия напряженного состояния [9]:

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)_{\text{мод}} = \text{idem} \quad \left(\frac{\sigma}{E}\right)_{\text{кон}} = \text{idem} \quad (5)$$

Для данной задачи применение элементов теории подобия обосновано обеспечением равной прочности модели и детали, недопускающей разрушение модели при эксперименте.

3. Экспериментальное исследование

Модель тензорезистора изготовлена из пластины поликарбоната толщиной 4 мм. Размеры модели (толщины изолятор-подложки и ЧЭ) увеличены в 350 раз по сравнению с размерами тензорезистора.

Изолятор подложка и ЧЭ выполнены раздельно и в дальнейшем соединены между собой и закреплены на образце, имитирующем деталь, с помощью эпоксидного клея – LARIT.

Эксперимент проведен на поляризационной установке ИМАШ-КБ-2 на кафедре 203 ХАИ. Нагрузочное устройство установки позволяет прикладывать к модели усилие до 10000 кг.

Проведена градуировка используемого материала на образце диаметром 5 см, который сжимали в специальном устройстве и просвечивали поляризованным светом (рис.3). Фиксируем нагрузку, при которой в центре образца появляется очередная полоса. Цена полосы материала толщиной 1 см определяется по формуле

$$\sigma_0^{1,0} = \frac{8P}{\pi D n_{\text{Ц}}}, \quad (6)$$

где D – диаметр диска;

P – сила сжатия;

$n_{\text{Ц}}$ – порядок в центре диска.

Поля изохром при различном нагружении диска приведены на рис. 3.

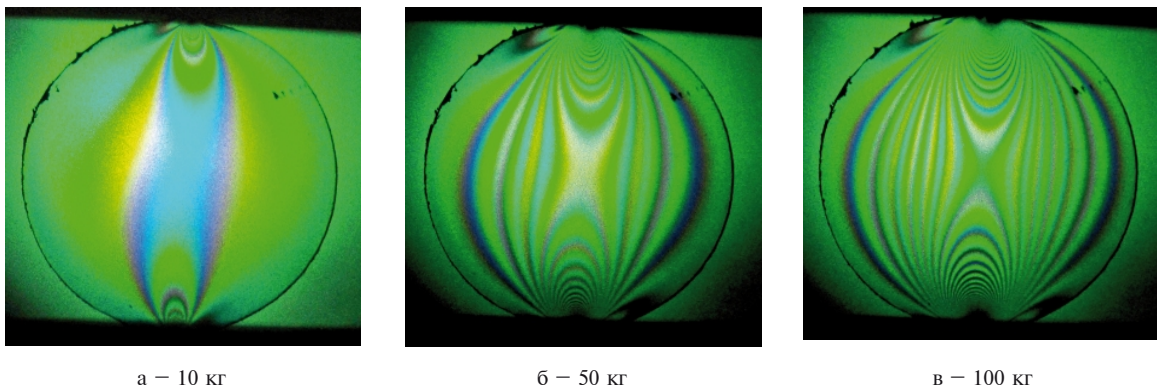


Рис. 3. Тарировочный диск с полем изохром при различной нагрузке сжатия

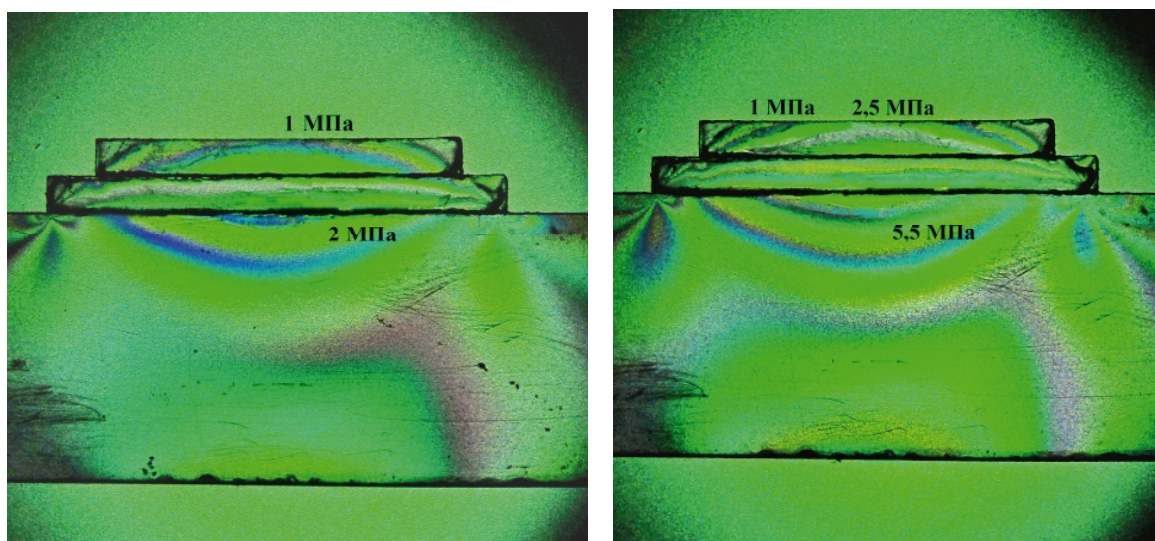
Распределение напряжений в исследуемой модели определяется по формуле

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_0^{1,0} n / h \quad (7),$$

где h – толщина модели,
 n – целое число, называемое порядком полосы.

С помощью рычагов и набора грузов реализуем схему растяжения «оптической» модели тензорезистора и снимаем картину поля изохром для усилий 50 и 100 кг (рис.4).

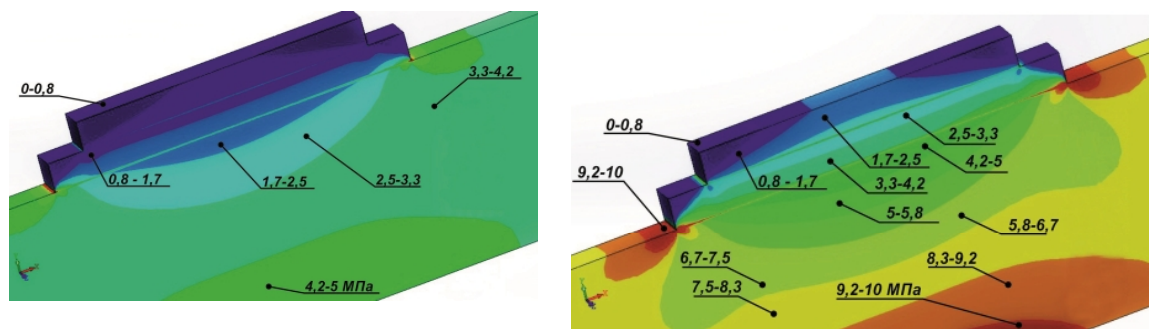
Для сравнительной оценки результатов распределения напряжений в тензорезисторе, полученных на поляризационной установке, были проведены расчеты напряженно-деформированного состояния модели тензорезистора методом конечных элементов (МКЭ). Построена твердотельная модель с помощью программы Cosmos-Works. Геометрические размеры модели аналогичны «оптической», материал – поликарбонат. Результаты напряженного состояния тензорезистора при нагрузке 50 и 100 кг, приведены на рис. 5.



а – 50 кг

б – 100 кг

Рис. 4. Поле линий изохром в модели тензорезистора при различной растягивающей нагрузке (изображено сверху вниз: ЧЭ, изолятор-подложка, нагружаемый образец-деталь)



а – 50 кг

б – 100 кг

Рис. 5. Изолинии в модели тензорезистора при нагружении растягивающим усилием, полученные МКЭ

Сравнение двух результатов: экспериментального на поляризационной установке и расчетного МКЭ, позволяет сделать следующие выводы:

- идентичность полей напряжений двух методов определения;
- нет полноты передачи деформации от образца-детали к ЧЭ тензорезистора, которая существенно зависит от толщины его элементов;
- распределение напряжений по длине чувствительного элемента тензорезистора - неравномерно (см.рис.5 б).

В заключение исследования нами проведен расчет передачи деформации в пленочном высокотемпературном тензорезисторе.

Расчеты проведены с использованием МКЭ для двух температурных состояний тензорезистора: - 400 °С (модуль упругости ЧЭ $E = 118$ ГПа, изолятор-подложка $E = 79$ ГПа); - 800 °С (ЧЭ $E = 90$ ГПа, изолятор-подложка $E = 45$ ГПа). Модель ВПТ представляет собой ЧЭ толщиной 50 мкм, закрепленный на изоляторе-подложке толщиной 75 мкм. ВПТ закреплен на градуировочной балке, выполненной из жаропрочного сплава ЖС6-К, к которой была приложена нагрузка, создающая напряжение растяжения – 100 МПа. Результаты расчета представлены на рис. 6. Коэффициент передачи деформации в ВПТ при температуре 900 °С составляет $\approx 0,58$. Этот недостаток устраняется индивидуальной градуировкой каждого типа тензорезистора.

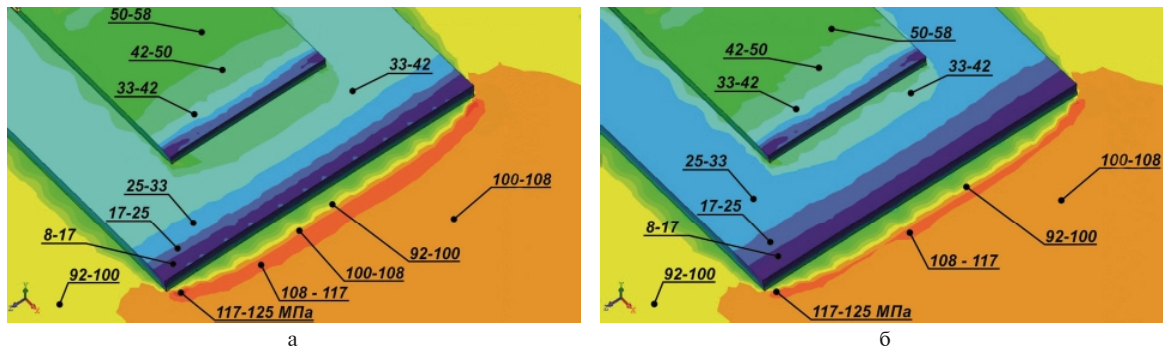


Рис. 6. Распределение напряжений в ВПТ при температуре 400 °С - а) и 900 °С - б)

Заключение

Проведенные исследования показали возможность применения поляризационного метода при оценке процесса передачи деформации в тензорезисторе.

В дальнейшем метод фотоупругости может быть применен к оценке влияния зоны контакта между ЧЭ и изолятором, а также изолятором и деталью на передачу деформации.

Литература

1. Мазо В.И. Передача деформации в малобазных наклеенных тензорезисторах [Текст]/ В.И. Мазо // Исследование и расчет напряжений в деталях машин и конструкциях: Машиностроение. 1966. - 56 с.
2. Анкудинов Д.Т. Малобазные тензорезисторы сопротивления. [Текст]/ Д.Т. Анкудинов, К.Н. Мамаев.: Машиностроение, 1968. - 188 с.
3. Рузги Э. Электрические тензодатчики [Текст] / Э. Рузга.-М.: Госэнергоиздат, 1961.- 336 с.
4. Клокова Н.П. Тензорезисторы [Текст]/ Н.П. Клокова.- М. : Машиностроение, 1990. -224 с.

5. 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.

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

7. Приходько И.М. Анализ напряженного состояния покрытий в зависимости от температур их формирования и соотношения ТКЛР с металлами [Текст]/ И.М. Приходько, В.Е. Веды // Системы обработки информации: сб. наук. праць НАНУ, ПАНМ, ХВУ. - Вип. 6(16).- X, 2001. - С. 216-222.

8. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений [Текст]: справ. Пособие.- К.: Наук. думка, 1981. - 583 с.

9. Третьяченко Г.Н. Моделирование при изучении прочности конструкции.: [Текст]/ Г.М. Третьяченко - К.: Наук. думка, 1979. - 323 с.

Поступила в редакцию 12.05.2014

Ю.О. Гусев, О.В. Білогуб, Камбіз Кахраї. Аналіз передачі деформації в високотемпературному плівковому тензорезисторі

Розглянуто основи передачі вимірюваної деформації чутливого елемента тензорезистора і перетворення її в прирощення його електричного сигналу. Наведено методику дослідження передачі деформації в тензорезисторі методом фотопружності, що використовує властивість деяких матеріалів подвійного променепереломлення при механічному навантаженні. Пропонуються результати експериментального дослідження моделі тензорезистора з полікарбонату. Представлені зображення ізохром при різному навантаженні моделі тензорезистора. Проведено порівняння результатів експериментального дослідження поляризаційним методом з даними розрахунку навантаження тієї ж моделі отриманими методом скінчених елементів. Наведено результати розрахунку передачі деформації в високотемпературному плівковому тензорезисторі. Представлений коефіцієнт передачі деформації моделі тензорезистора з полікарбонату, а також відповідний коефіцієнт плівкового тензорезистора при різних температурних умовах його роботи.

Ключові слова: тензорезистор, чутливий елемент, ізолятор-підкладка, фотопружність, поле ізохром, деформація, полікарбонат, полярископ, поляроїд.

Y.A. Gusev, A.V. Belogub, Kambiz Kahrai. Deformation transfer analysis in the high-temperature film resistive-strain sensor

The bases of measured deformation transfer to sensing element of resistive strain sensor and deformation conversion to electric signal was considered. The methodology of study of deformation transfer in the resistive strain sensor was presented. This methodology is based on photoelasticity effect that is a property of some materials of double refraction while mechanical loads. The results of experimental research with polycarbonate model of resistive strain sensor are applied. The isochromatic curves of different model loads are presented. The comparison of two methods: the experimental research with polarization method based on photoelasticity effect and finite element method was carried out. The results of calculation of deformation transfer in the high-temperature film resistive strain sensor are presented. The coefficient of deformation transfer in the polycarbonate model of resistive strain sensor and respective coefficient of film resistive strain sensor under different temperatures were presented.

Key words: *resistive strain sensor, sensing element, insulator-padding, photoelasticity, isochromatic curves field, deformation, polycarbonate, polariscope, polaroid.*