

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА



В НОМЕРЕ:

- ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛИЧЕНИЕМ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ОДНОГО УРОВНЯ ТОЧНОСТИ
- ПОДБОРКА СТАТЕЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ВСЕСОЮЗНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТЕНЗОМЕТРИИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ»
- СЕРИЯ СТАТЕЙ, ПОСВЯЩЕННЫХ ГОСУДАРСТВЕННОМУ СТАНДАРТНЫМ ОБРАЗЦАМ СОСТАВА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ
- ДОГОВОР ИЛИ ФОНД НА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ?
- О НОРМИРОВАНИИ ТРУДОЕМКОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ, СОДЕРЖАЩИХ ОПЕРАЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ
- МОДЕРНИЗАЦИЯ СЕРИЙНЫХ МЕР НАПРЯЖЕНИЯ
- НОВЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

МОСКВА · ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ

1991

3

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

1991

Основан в 1939 г.

март • 3

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ
ГОСУДАРСТВЕННОГО
КОМИТЕТА
СССР
ПО УПРАВЛЕНИЮ
КАЧЕСТВОМ
ПРОДУКЦИИ
И СТАНДАРТАМ

C-368



СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- Ж. Ф. Кудряшова. Определение метрологических характеристик сличением средств измерений одного уровня точности 3

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. А. Шангин, А. М. Райцин, И. И. Шангина. Измерение энергетической расходимости лазерных пучков 6
В. Н. Антипов, Н. К. Щербакова. Определение газовой и колебательной температур в резонаторе CO₂ лазера по собственному спектру излучения 7
Е. С. Авдошин. Двухканальный световодный инфракрасный радиометр с полупроводниковым модулятором 9
Т. М. Волосатова, М. В. Филиппов. Оценка точности измерения продольных размеров объекта при использовании численных методов расчета когерентных импульсных передатчиков 12

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- М. М. Лупинский, Г. В. Василяди, Б. В. Гуменюк, В. Л. Королев, В. А. Крюков, А. В. Ретивов, В. М. Фильдштейн. Образцовые средства поверки тензорезисторов 14
И. А. Большакова, И. Д. Гортинская, И. Я. Подстригач, С. Р. Сиверс. Исследование динамических характеристик германиевых тензорезисторов в импульсном режиме 16
И. А. Чернов. Определение поперечной чувствительности тензорезисторов 17
Е. В. Патокин, А. В. Сладковский, М. Д. Соболев. Установка для воспроизведения упругопластических деформаций 20
Ю. Г. Быков, Л. С. Кузнецова. Оценка накопления усталостных повреждений фольговыми датчиками усталости 21
Л. Г. Архарова, Е. А. Желонкин, А. Л. Колесников, П. И. Пивоненков, Ю. М. Спалек, М. Ю. Тихомиров. Малогабаритный кремниевый акселерометр с термокомпенсированным сигналом в диапазоне температур 0—200 °С 24
В. В. Рубан, Н. А. Фот, В. В. Ниженко, Б. В. Марасин, М. Х. Хафизов. Применение бесконтактного тензометра в высокотемпературном dilatометре 25

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Е. М. Зайцева, В. А. Холмянский. Термоэлектрическая неоднородность термоэлектродных макрокомпозигов 28

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- М. Н. Сурду, В. П. Салюк, Ф. Е. Курочкин, И. В. Бобров. Повышение точности измерений параметров комплексных сопротивлений четырехплечими мостами переменного тока 30
А. А. Ишутин. Цифровой фазометр 31
Э. Г. Исмаев. Топологический метод расчета магнитных систем частотных датчиков 33
А. В. Мачульский, Ю. И. Мороз. Метод автоматизированной обработки сигналов колебаний скорости носителя магнитной записи и детонации звука 36

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Ю. В. Рясный, О. Б. Журавлева, В. П. Пологрудов. Оптимизация структуры двенадцатиполусных измерительных преобразователей 37
Ю. П. Потапов, С. А. Зарубин, Е. Б. Марамчина. Измерительная система для проверки цифровых осциллографов 38
О. Г. Петросян. Аттестация волноводных мер СПМШ миллиметрового диапазона 40
В. А. Пронин. Выбор частотного диапазона и границ зоны однородности источника магнитного поля на основе спирального волновода 41

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. М. Богомольный. Применение полярных керамических диэлектриков в измерительной технике 44
Н. И. Гриценко, В. Н. Зинченко, И. Ю. Криков, В. К. Семенов. Погрешность определения антирезонансной частоты пьезоэлементов, обусловленная высшими гармониками сигнала генератора 45
О. Л. Петровский, В. Н. Шалыгин. Возможности организации акустико-эмиссионного контроля режимов термообработки изделий из полимерных композитных материалов 47

БИОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕДИЦИНСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Л. А. Зиновьева, А. И. Зиновьев. Исследование распределения электромагнитного поля индуктивного высокочастотного преобразователя внутри модели биообъекта 49

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Т. Н. Иванов, А. Н. Атанов, Я. Н. Муджири. Роль и место стандартных образцов состава в системе метроло-

Установка для воспроизведения упругопластических деформаций

Е. В. ПАТОКИН, А. В. СЛАДКОВСКИЙ, М. Д. СОВОЛЕВ

Широко используемые при прочностной обработке деталей машин и механизмов тензорезисторы (ТР) (в частности, типа КФ) имеют характеристики, нормируемые в диапазоне деформаций $\epsilon = \pm 3000$ млн⁻¹ [1]. Известно, что для упругопластических деформаций принципиально возможно использовать ТР типа КФ [2]. Однако применять указанные ТР для этого диапазона деформаций можно лишь при условии надежного определения их метрологических характеристик. Известные в настоящее время установки для воспроизведения больших деформаций (УБД) [2—4] эту задачу в полной мере не решают.

Для средств воспроизведения деформации характерна следующая структурная схема, состоящая из трех взаимосвязанных элементов: силового узла, упругого элемента (УЭ) и средства измерений заданного уровня деформации. Общий недостаток имеющихся УБД — использование металлического УЭ, вследствие чего происходит накопление остаточных деформаций после первого цикла нагружения, усложнение схемы приложения и снятия нагрузки, сокращение количества циклов эксплуатации. Практическую ценность в этом плане представляет применение комбинированного УЭ (КУЭ). В качестве КУЭ может служить композитная балка, состоящая из двух жестко соединенных материалов: основы с высоким пределом упругости и защитного покрытия.

При построении средств воспроизведения деформации наиболее эффективной является схема чистого изгиба [5]. Поэтому был разработан КУЭ в виде балки равного сечения, состоящей из толстой поликарбонатной (ПК) основы и тонких металлических покрытий, наносимых методом термического напыления [6]. Тем самым устраняются перечисленные выше недостатки металлических УЭ.

Книжечная схема УБД аналогична схеме широко известной установки Т-12. Отличия лишь в следующем: увеличен ход ходового винта до 130 мм, опоры для нагружения балки сделаны вращающимися, прогибомер в виде координатной базы 180 мм закрепляется непосредственно на КУЭ. Габаритные размеры установки 400×360×460 мм, КУЭ — 30×30×400 мм; масса установки около 25 кг.

Размеры КУЭ и диапазон воспроизводимых на УБД деформаций определяли исходя из особенностей характеристик ПК. Согласно теории балок чистого изгиба можно записать следующее уравнение для предельного значения толщины УЭ:

$$h_{пр} = \frac{\sigma_{пр}(L^2 + 4f^2)}{4f(E - \sigma_{пр})}, \quad (1)$$

где $\sigma_{пр}$ — предельное напряжение при изгибе; f — стрела прогиба на базе L ; E — модуль упругости материала.

Расчет по (1) при коэффициенте запаса по предельным напряжениям $n = 1,4$ для заданных параметров ПК ($\sigma_{пр} = 110$ МПа, $E = 2200$ МПа) и прогибомера ($L = 0,18$ м, $f_{max} = 0,01$ м) показывает, что рабочее значение толщины h_p КУЭ составляет 30 мм. Подставив h_p , L и f_{max} в формулу для расчета деформации [7]

$$\epsilon = \frac{4h_p f_{max}}{L^2 + 4h_p f_{max} + 4f_{max}^2},$$

получим $\epsilon_{max} = 35000$ млн⁻¹.

Однако приведенный расчет не учитывает такую существенную особенность механики разрушения полимеров, как масштабный эффект прочности, под которым понимается связь между размерами балки и ее прочностью [8]. С точки зрения статистической теории масштабного эффекта можно записать следующее уравнение для критической деформации:

$$\epsilon_{кр} = \frac{a}{E} (1/\sqrt{bh}), \quad (2)$$

где a — постоянная, зависящая от материала и вида нагружения; b — ширина балки.

Подставив в (2) экспериментально определенную для ПК постоянную $a = 10,8$ МПа·м^{1/2} и ширину $b = 0,03$ м, получим деформацию разрушения $\epsilon_{кр} = 28000$ млн⁻¹. Приняв коэффициент запаса $n = 1,4$, окончательно установим диапазон воспроизводимых на УБД деформаций: ± 20000 млн⁻¹.

В УЭ из ПК возникают поверхностные трещины «серебра» [8]. Они растут в направлении, перпендикулярном деформации

растяжения, т. е. перерезают нити чувствительного элемента ТР. Трещины имеют форму острой канавки и образуют поверхностную выемку глубиной 0,1—1 мкм. Защищает ТР от разрушающего действия трещины «серебра» металлическое покрытие. Нанесенный металл имеет аморфную структуру и при больших деформациях не разрушается, а, расслаиваясь, заполняет трещины «серебра». Толщина металлического покрытия КУЭ составляет 2—3 мкм. Кроме того, покрытие имитирует адгезионные свойства нанесенного материала и, что не менее важно, защищает поверхность от разрушающего действия клея (практически все клеи являются сильными растворителями).

В процессе исследований УБД проанализированы факторы, влияющие на погрешность воспроизведения деформации. Результаты исследований приведены в таблице, где $P(\mu = 0,40)$, $P(\mu = 0,38)$ — поправки к показаниям прогибомера при соответствующих значениях коэффициента Пуассона μ ПК; e — смещение нейтральной линии КУЭ; δ_e — суммарная погрешность расчета ϵ ; α — коэффициент армирования ТР КУЭ; β — температурный коэффициент линейного расширения ПК; β_k — температурный коэффициент модуля упругости ПК.

Методика определения составляющих суммарной погрешности S_p , θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 , θ_5 , θ_6 , θ_7 подробно изложена в [5]. Здесь же рассмотрим только составляющие, характерные для КУЭ.

Поскольку КУЭ является композитным материалом, то его

Источник погрешности	Выражение для расчета погрешности	Значение составляющих суммарной погрешности, %
Отклонение упругой линии КУЭ от дуги окружности	$S_p = \frac{100}{\epsilon} \sqrt{\frac{1}{4} \sum_1^k (\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_i)^2}$	0,93
	$\theta_1 = \frac{(\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_3) \cdot 100}{\bar{\epsilon}}$	0,89
Неравномерность толщины Δb и ширины Δh КУЭ, неперпендикулярность его граней	$\theta_2 = \left(\frac{\Delta b}{b} + \frac{2\Delta h}{h} \right) \cdot 100$	0,17
Неравномерность толщины напыленного слоя металла	$\theta_3 = \left(1 - \frac{E(h_{me \min})}{E(h_{me \max})} \right) \cdot 100$	0,16
Инструментальная погрешность прогибомера	$\theta_4 = \frac{\Delta_{ин} j}{f_j} \cdot 100$	2,22
	$\theta_5 = \frac{\Delta_{ин}}{L} \cdot 100$	0,002
Поперечный изгиб балки	$\theta_6 = \frac{P_j(\mu=0,40) - P_j(\mu=0,38)}{f_j} \times 100$	0,01
Смещение нейтральной линии	$\theta_7 = \frac{2e_j}{h} \delta_e$	0,21
Армирование поверхностных волокон балки тензорезистором	$S_\alpha = \frac{100}{\epsilon} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\alpha_j - \alpha)^2}$	0,66
Изменение температуры в процессе применения (Δt_1) и измерения (Δt_2)	$\theta_8 = \beta \Delta t_1 \cdot 100$	0,05
	$\theta_9 = \beta_k \Delta t_2 \cdot 100$	0,10

модуль упругости рассчитывается по формуле

$$E_{\text{КУЭ}} = \frac{E_{\text{ПК}} h_{\text{ПК}} + E_{\text{ме}} 2h_{\text{ме}}}{h_{\text{ПК}} + 2h_{\text{ме}}}$$

В процессе напыления толщина металлического покрытия $h_{\text{ме}}$ распределяется неравномерно по поверхности ПК, причем независимо от шероховатости балки, так как покрытие повторяет рельеф балки. Максимальное количество металла ($h_{\text{ме max}}$) оседает в центре КУЭ, а минимальное — по краям рабочей зоны балки. Максимальная неравномерность толщины покрытия составляет 15%.

Поперечные деформации ϵ_n искажают форму поперечного сечения КУЭ при изгибе. Поэтому с учетом того, что стержень индикатора находится на расстоянии $L/2$ от опор прогибомера, в показании прогибомера необходимо вводить поправку $\Pi = f_n/2$, где f_n — стрела прогиба на поперечной базе L_n прогибомера. Для расчета Π в соотношении $\epsilon_n = \mu$ подставим

$$\epsilon_n = \frac{4hf_n}{L_n^2 + 4f_n^2 - 4hf_n};$$

$$\epsilon = \frac{4hf}{L^2 + 4f^2 + 4hf}$$

В результате получим

$$\Pi = \frac{0,5\mu f L_n^2}{L^2 + 4f^2 + 4hf + hf\mu}$$

Из-за разброса коэффициента Пуассона ПК ($\mu = 0,38 \dots 0,40$) Π определяется с неисключенным остатком систематической погрешности θ_n .

Известно [9], что при изгибе балки происходит смещение ее нейтральной линии относительно продольной оси симметрии, так как модуль упругости материала при сжатии отличается от модуля упругости при растяжении ($E_c \neq E_p$). Для ПК справедливо соотношение $E_c/E_p = 1,05 \dots 1,08$. Следовательно, в формулу [7]

$$\epsilon = \frac{4(h+2\Delta h)f}{L^2 + 4f^2 \pm hf} \quad (3)$$

где Δh — расстояние от поверхности балки до тензочувствительного элемента, необходимо ввести поправку, учитывающую смещение нейтральной линии e . Рассмотрев геометрию деформированной балки, запишем следующее выражение для радиуса кривизны растягиваемой поверхности с учетом смещения нейтральной линии в сторону сжатых волокон ($E_c > E_p$):

$$\rho = \frac{L^2 + 4f^2}{8f} - e - \frac{h}{2}$$

Тогда для деформации на растянутой поверхности справедливо соотношение

$$\epsilon_p = \frac{4(h+2\Delta h+2e)f}{L^2 + 4f^2 - 4hf - 8ef} \quad (4)$$

Аналогичным образом выводится формула для сжатой поверхности

$$\epsilon_c = \frac{4(h+2\Delta h-2e)f}{L^2 + 4f^2 + 4hf - 8ef} \quad (5)$$

Таким образом, при использовании в УБД КУЭ значение номинальной деформации должно рассчитываться по (4) и (5), расчет по (3) для КУЭ влечет максимальную систематическую погрешность 3%. Авторами разработана программа расчета e в функции от свойств материала. Однако в этом случае необходимо учесть остаток неисключенной системати-

ческой погрешности θ_f (см. таблицу, где

$$\theta_f = 2 \sqrt{S_E^2 + S_{\text{ан}}^2 + S_{\text{анн}}^2};$$

$S_E, S_{\text{ан}}, S_{\text{анн}}$ — максимальные СКО, полученные при усреднении экспериментального модуля упругости УЭ, аппроксимации зависимостей $E(\epsilon)$ и $e(f)$ соответственно).

Основа КУЭ является низкомолекулярным материалом, поэтому при наклеивке на него ТР происходит локальное армирование поверхностных волокон. Этот эффект можно учесть с помощью коэффициента армирования [10]

$$\alpha = \epsilon/\epsilon' \quad (6)$$

где ϵ, ϵ' — деформации балки, нагруженной без ТР и с ТР соответственно.

Для практического определения α вместо (6) можно воспользоваться отношением чувствительностей

$$\alpha = \bar{K}_{\text{ме}}/\bar{K}_{\text{КУЭ}},$$

где $\bar{K}_{\text{ме}}$ и $\bar{K}_{\text{КУЭ}}$ — средневыборочные значения чувствительностей ТР из одной партии, определяемые на УБД соответственно с использованием металлической балки по [8] и КУЭ с учетом параметра e в диапазоне деформаций ± 3000 млн⁻¹.

Значения α и S_{α} для различных типоразмеров ТР и условий их использования будут различны. Поэтому при указании параметров α и S_{α} конкретизируются условия, при которых они получены.

Проведенные исследования УБД позволяют установить оценку СКО случайной составляющей погрешности воспроизведения деформации $S_{\theta} = 1,14\%$ и неисключенного остатка систематической погрешности $\theta_{\theta} = 2,65\%$.

Высокая эластичность ПК вызывает необходимость исследования гистерезиса установки f_r и временной нестабильности поддержания деформации $\Delta_{\text{вр}}$. Измерение параметров f_r и $\Delta_{\text{вр}}$ проводилось по методике, изложенной в [11].

Таким образом, на базе КУЭ разработана установка для воспроизведения деформации в диапазоне ± 20000 млн⁻¹ со следующими характеристиками: границей относительной погрешности воспроизведения деформации $\delta_{\theta} = 3,5\%$ при доверительной вероятности $P = 0,95$; механическим гистерезисом f_r не более 90 мкм; временной нестабильностью поддержания деформации в течение часа $\Delta_{\text{вр}}$ не более 0,6%.

ЛИТЕРАТУРА

1. ТУ 25-06.2002—80. Тензорезисторы КФ4, КФ5. Технические условия.
2. Базин Ю. М. и др. // Измерительная техника.— 1984.— № 8.— С. 40.
3. А. с. 838437 СССР / И. А. Чернов и др. // Открытия. Изобретения.— 1981.— № 22.
4. А. с. 945730 СССР / И. Ф. Савицкая и др. // Открытия. Изобретения.— 1982.— № 27.
5. Лулинский М. М. и др. // Измерительная техника.— 1987.— № 2.— С. 33.
6. А. с. 1242739 СССР / Е. В. Патокин и др. // Открытия. Изобретения.— 1986.— № 25.
7. ГОСТ 21615—76. Тензорезисторы. Методы определения характеристик.
8. Бартенов Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров.— М.: Химия, 1984.
9. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести.— М.: Машиностроение, 1968.
10. Петров В. В., Сладковский А. В. // Метрология.— 1986.— № 6.— С. 54.
11. МИ 1742—87. Установки для воспроизведения деформации. Методика поверки.