

ТЕРМОУПРУГОЕ ПОСЛЕДЕЙСТВИЕ И ЕГО КОМПЕНСАЦИЯ В ТЕНЗОДИНАМОМЕТРАХ ДЛЯ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

Е. В. Штайгер

Одесса

При разработке средств автоматического контроля ударных нагрузок большое значение имеет учет и компенсация погрешности термоупругого последствия.

Явление термоупругого последствия, или дефект модуля, заключается в том, что с возникновением в упругом теле неоднородного напряженного состояния (например при изгибе) на его поверхностях наблюдаются разность температур и, следовательно, появляются температурные напряжения. Они противодействуют напряжениям, пропорциональным приложенной извне силе. В результате в какой-то момент времени возникает несоответствие между величиной деформации упругого тела и величиной приложенной к нему силы, деформация как бы запаздывает.

В тензометрических динамометрах упругое тело является мерительным элементом, поэтому временное несоответствие между прикладываемой силой и деформацией упругого тела от явления термоупругого последствия проявится как погрешность измерения силы. Эта погрешность тем значительнее, чем круче фронт нарастания нагрузки и чем короче время между моментами становления нагрузки и регистрации значения силы вторичным прибором, потому что проявление дефекта модуля исчезает не сразу, а длится несколько секунд — время, которое необходимо для протекания релаксационного процесса теплопроводности.

Особенно велика погрешность от термоупругого последствия при регистрации тензометрическими динамометрами усилий ударного характера.

Рассмотрим явление термоупругого последствия применительно к динамометрам особой группы, у которых чувствительный элемент имеет форму кольцевой пластины и оснащен тензорезисторами круглонавигного типа. Механизм передачи деформации от упругого тела к проволоке в таких чувствительных элементах обеспечивает очень высокие метрологические качества динамометра [1].

Такие динамометры надежно работают в режиме ударных нагрузок и потому представляют особый интерес как приборы для регистрации динамических явлений в натуральных условиях.

При быстром нагружении, приближающемся по характеру к удару, при котором можно пренебречь обменом тепла со средой, окружающей упругий элемент (адиабатический процесс), согласно первому термодинамическому закону сохранения энергии для случая осевых деформаций справедливо следующее соотношение:

$$\Delta T = \frac{TB\sigma}{C_v Q}, \quad (1)$$

где T — абсолютная температура;
 ΔT — ее изменение;

B — коэффициент объемного расширения, например, для стали
 $B = 3\beta_{\text{ст}}$;
 σ — напряжение в осевом направлении;
 Q — плотность;
 C_v — удельная теплоемкость.

Это хорошо согласуется с известным термодинамическим принципом Ле Шателье—Брауна: внешнее воздействие, выводящее тело из равновесия, вызывает в нем процессы, стремящиеся ослабить результаты этого воздействия.

В сталях, как и в большинстве металлов, растяжение сопровождается охлаждением, а сжатие — нагреванием [2].

При напряжении в стальных упругих элементах динамометров $\sigma_{\text{max}} = 2500 \text{ кг/см}^2$ из формулы (1) получаем

$$\Delta T = \pm 6,4^\circ \text{K}$$

(знак «+» при сжатии, знак «—» при растяжении).

Количественные данные изменения температуры упругого элемента динамометра при мгновенном нагружении (разгрузении), полученные нами экспериментальным путем, близки к расчетным.

Оценим порядок погрешности, вносимой термоупругим эффектом, воспользовавшись известной формулой температурного напряжения в материале

$$\sigma_T = \beta E \Delta T. \quad (2)$$

Здесь E — модуль упругости материала;

β — коэффициент продольного температурного расширения.

Если принять $\Delta T = 1^\circ \text{C}$, получим для стали

$$\sigma_T = -26,25 \text{ кг/см}^2 \text{ } 1^\circ \text{C}.$$

Относительная погрешность в рассмотренном случае только вследствие временного несоответствия между деформацией и контролируемой силой составит

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_{\text{max}}} = -1\% \text{ } 1^\circ \text{C}.$$

Деформацию упругого тела воспринимают навитые на нем тензорезисторы из константановой проволоки. Вместе с деформацией тензорезисторы воспринимают и температуру упругого тела. В соответствии с коэффициентом температурного расширения и температурным коэффициентом сопротивления проволоки в последней появляются температурные приращения сопротивления, которые также внесут погрешность в измерение силы, приложенной к динамометру.

Разница между коэффициентами продольного температурного расширения стали $\beta_{\text{ст}}$ и константана $\beta_{\text{к}}$ внесет погрешность из-за возникновения в тензопроволоке напряжения

$$\sigma_\beta = E_{\text{к}} (\beta_{\text{к}} - \beta_{\text{ст}}) \Delta T. \quad (3)$$

Из справочных таблиц для константана $E_{\text{к}} = 1,48 \cdot 10^6$, $\beta_{\text{к}} = 15,2 \cdot 10^{-6}$; для стали $\beta_{\text{ст}} = 12,5 \cdot 10^{-6}$.

При $\Delta T = 1^\circ \text{C}$ $\sigma_\beta = -4 \text{ кг/см}^2 \text{ } 1^\circ \text{C}$.

Относительная погрешность в рассмотренном случае

$$\frac{\sigma_\beta}{\sigma_{\text{max}}} = -0,16\% \text{ } 1^\circ \text{C}.$$

Погрешность от температурного коэффициента сопротивления проволоки тензорезистора определим следующим образом.

Приращение тензорезистора при $\Delta T = 1^\circ\text{C}$

$$\Delta R_\alpha = R_{20} \alpha_T. \quad (4)$$

Здесь R_{20} — сопротивление проволоки при температуре 20°C .

У константановой проволоки промышленного производства значения α_T находятся в пределах от $+5 \cdot 10^{-5}$ до $-5 \cdot 10^{-5}$. Следовательно, для тензорезистора с сопротивлением, к примеру, $R_{20} = 1000 \text{ ом}$ при $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ $\Delta R_\alpha = 0,05 \text{ ом}$ с соответствующим знаком.

Приращение сопротивления тензорезистора от деформации чувствительного элемента под воздействием измеряемой силы P , при коэффициенте тензочувствительности проволоки $K_T = 2,2$ и $\sigma_{\max} = 2500 \text{ кг/см}^2$,

$$\Delta R_P = \frac{\sigma_{\max} R K_T}{E_{\text{ст}}} = 2,5 \text{ ом}. \quad (5)$$

Относительная погрешность в этом случае

$$\frac{\Delta R_\alpha}{\Delta R_P} = \pm 2\% \quad 1^\circ\text{C}.$$

Знак здесь соответствует знаку α_T проволоки тензорезистора.

Приведенные примеры показывают, что погрешность от термоупругого последствия носит совсем не безобидный характер, особенно если это касается прецизионных тензометрических устройств, например весов для взвешивания движущегося по ним колесного транспорта. Экспериментально нами установлено, что при накатывании на тензометрические весы колесной пары железнодорожного вагона, движущегося со скоростью 6—8 км/ч, погрешность от термоупругого последствия достигает 5%. Описываемое явление хорошо просматривается на экране электронного осциллографа, включенного в качестве нуль-индикатора в сбалансированный мост, который состоит из тензорезисторов динамометра и питается переменным током несущей частоты.

При мгновенно снятой нагрузке на экране виден процесс спада амплитуды небаланса моста, который протекает по экспоненциальному закону и полностью затухает через 3—5 секунд. Аналогичны показания термопар, расположенных на поверхностях исследуемого упругого элемента.

В приведенных примерах обращает на себя внимание то обстоятельство, что приращение сопротивления константановой проволоки от α_T соизмеримо по величине с нежелательным приращением от σ_3 и, главное, с временным несоответствием между приложенной силой и деформацией упругого элемента.

Не менее важно и то, что α_T константана зависит от технологии производства проволоки и может иметь как положительный, так и отрицательный знак.

Из этого следует, что при определенных условиях тепло, выделяемое на поверхности упругого тела, может управлять сопротивлением навитой на нем проволоки в направлении компенсации термоупругого эффекта.

Таким образом, в основу предлагаемого механизма компенсации заложено следующее: импульс тепла, пропорциональный проявлению дефекта модуля, вызывает в тензорезисторе приращение сопротивления, возмещающее недостающую величину деформации. При этом достаточно, чтобы рассмотренные величины, обуславливающие погрешности, удовлетворили уравнению

$$\Delta R_{\sigma(T)} + \Delta R_\beta + \Delta R_\alpha = 0. \quad (6)$$

Здесь $\Delta R_{\alpha(T)}$ — приращение сопротивления тензорезистора, соответствующее величине проявления дефекта модуля σ_T ;

ΔR_{β} — приращение сопротивления тензорезистора, соответствующее величине σ_{β} .

Из (6) получаем условие компенсации

$$\Delta R_{\alpha} = -(\Delta R_{\sigma(T)} + \Delta R_{\beta}). \quad (7)$$

Подставив в выражение (6) значения (2), (3), (4), найдем температурный коэффициент сопротивления, который должна иметь константовая проволока, отобранная для изготовления тензорезисторов, автоматически компенсирующих термоупругое последствие

$$\alpha_T = \frac{K_T}{\varphi_E} [(1 - \psi_E) \beta_{ст} - \beta_k], \quad (8)$$

где

$$\psi_E = \frac{E_{ст}}{E_k}.$$

Подставим в (8) значения коэффициентов, взятых из справочных таблиц:

$$\alpha_T = -3,2 \cdot 10^{-5}.$$

Располагая конкретными характеристиками материалов, выбранных для изготовления чувствительного элемента динамометра, требуемое значение α_T можно несколько уточнить.

Приведенный расчет хорошо согласуется с опытом. Динамометры, выполненные по рекомендуемой методике и установленные в тензометрические весы для взвешивания железнодорожных вагонов в движении, не дают заметной погрешности от термоупругого последствия.

ВЫВОДЫ

1. Погрешность тензодинамометров от термоупругого последствия при регистрации ударной нагрузки, выражающаяся в некотором запаздывании деформации от напряжения в упругом теле, может быть скомпенсирована. Для этого следует изготавливать тензорезисторы из константовой проволоки с отрицательным коэффициентом температурного сопротивления. При этом значение $\alpha_T = -3,2 \cdot 10^{-5}$.

2. Пользуясь выведенной формулой, величину погрешности тензодинамометра от термоупругого последствия можно снизить на 1 порядок. Практически представляется возможным снизить эту погрешность до 0,1%.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Дымковский, А. С. Радчик, Е. В. Штайгер. Динамометрический датчик. «Приборостроение», 1963, № 3.
2. Б. Н. Финкельштейн. Внутреннее трение металлов и сплавов. «Труды научно-технического совещания по изучению рассеивания энергии при колебаниях упругих тел». Изд-во АН УССР, К., 1958.