

Experimentální Analýza Napětí 2003

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION USING STRAIN GAUGES

EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ KOEFICIENTU TEPLOTNÍ ROZTAŽNOSTI POMOCÍ ODPOROVÉ TENZOMETRIE

Jan Řezníček¹⁾, Tomáš Holkup¹⁾, Jitka Řezníčková²⁾

Abstract: In the field of stress analysis we often have to count with thermal expansion of a researched subject. For the description of that we need to know the material thermal expansion coefficient signed α . The principle of our experiment was to trace the specimen's deformation depending on temperature. As measurement space we used a standard electric furnace, which was able to change the specimen's temperature on the required thermal range. We tried to propose a universal experimental method to determinate the thermal expansion coefficient of a general solid material with approximately known chemical composition. We can say that the values of thermal expansion coefficient given by even the very narrow thermal range $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ were well balanced, with a deviation lower than 2%.

Keywords: thermal expansion coefficient, strain gauges, experiment design

ÚVOD

V úlohách pružnosti a pevnosti se často setkáváme s nutností uvažovat změnu rozměrů tělesa způsobenou změnou jeho teploty případně zahrnout změny teploty do vyhodnocení experimentu. K popisu dějů způsobených změnou teploty je pak nutno znát koeficient teplotní roztažnosti α materiálu ($\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$), v případě nelineární závislosti pak celý polynom.

Pokud známe přesné chemické složení tohoto materiálu, je většinou možné jeho koeficient vyhledat v materiálových tabulkách, i když ani zde nezískáme zcela přesnou hodnotu. Pokud však přesné složení neznáme nebo hledaný materiál v tabulce chybí, jsme nuceni buď použít „nepřesnou“ hodnotu odhadnutou z tabulek pro podobný materiál, nebo koeficient teplotní roztažnosti experimentálně stanovit.

Pokusili jsme se navrhnout univerzální experimentální postup využívající možností odporových tenzometrů, kterým lze stanovit koeficient teplotní roztažnosti běžných materiálů, u kterých blíže neznáme přesné chemické složení. Při experimentech jsme se omezili jen na obecné označení materiálu: „ocel“, „dural“ a „měď“.

¹⁾ Ing. Jan Řezníček, CSc., Ing. Tomáš Holkup: Ú 205.1 - Ústav mechaniky, odbor pružnosti a pevnosti, Fakulta strojní ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6, CZ, tel.: 224 352 517, fax: 233 322 482
e-mail: reznicek@fsid.cvut.cz, tomac@centrum.cz

²⁾ Ing. Jitka Řezníčková, CSc.: K 618 - Katedra mechaniky a materiálů, Fakulta dopravní ČVUT v Praze, Na Florenci 25, 110 00 Praha 1, tel.: 224 890 729, e-mail: reznickova@fd.cvut.cz

VLASTNÍ MĚŘENÍ

Cílem experimentu je sledovat rozměrové změny vzorku vystaveného teplotním změnám, naměřené hodnoty zpracovat a stanovit koeficient teplotní roztažnosti, resp. polynom. Získané výsledky pak podrobit analýze chyb a zhodnotit jejich použitelnost v praxi.

Jako měřicí prostor byla použita elektrická pec, která umožňuje měnit teplotu v požadovaném intervalu (tj. teplota okolí až $T_{\max} \approx 110^\circ\text{C}$). Předpokládali jsme obecné nerovnoměrné ohřívání s různými hodnotami na protilehlých stranách vzorku. Použili jsme tedy dva tenzometry k měření prodloužení a dva teploměry pro stanovení okamžité teploty vzorku. Pro další zpracování lze tuto nerovnoměrnost odstranit prostým průměrem obou deformací a teplot.

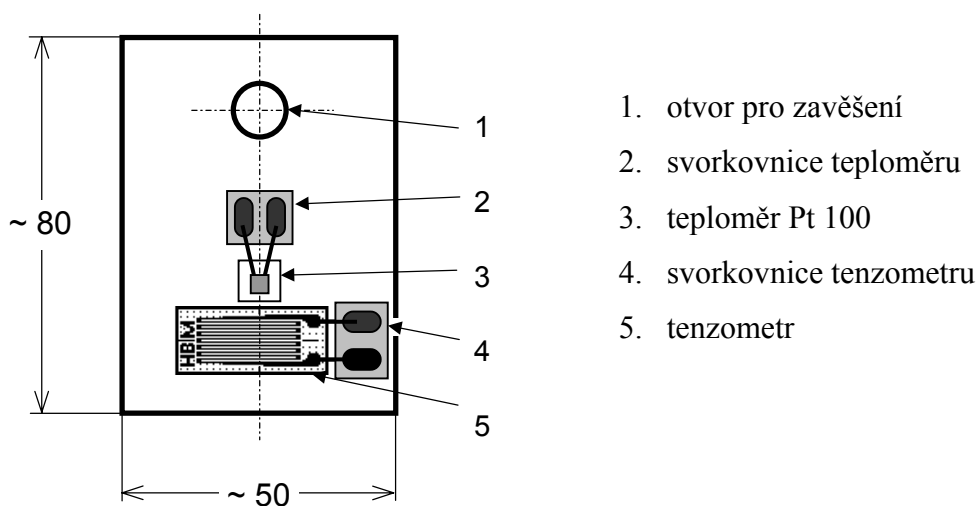
Pro tento způsob měření (indikace každého měřicího místa zvlášť) je optimální použití čtyř jednoduchých **čtvrtmostových zapojení**. Použitá ústředna UPM 60 navíc umožňuje pomocí čtyřdrátkového zapojení eliminovat vliv teploty na vedení každého z měřicích míst.

Měřený vzorek

Pro vlastní měření jsme zvolili tři vzorky ze tří různých materiálů (ocel, slit. hliníku, slit. mědi). U těchto materiálů jsme znali součinitel teplotní roztažnosti pouze orientačně z tabulek ($\pm 10\%$).

Výběr tenzometru

V případě teplotního prodloužení se jedná o víceosou deformaci se známým poměrem příčné a podélné složky: $\varepsilon_t / \varepsilon_l = 1$. Bude tedy stačit standardní tenzometr s jedinou měřicí mřížkou. Při volbě typu rozhoduje orientačně typ materiálu, pro nějž je tenzometr kompenzován. Existují však dvě základní možnosti: volit tenzometr pro podobný materiál, či záměrně volit tenzometr pro co nejvíce různý materiál. Již zde lze konstatovat, že při dodržení zásad přesnosti měření a zpracování naměřených hodnot dávají oba přístupy uspokojivé výsledky.



Schématické uspořádání vzorku
(druhá strana je identická)

U každého ze tří vzorků jsme provedli nejprve jedno zkušební měření a pak několik cyklů měření teplotní roztažnosti na celkovém teplotním intervalu $T \in (\text{cca } 20 \div 110)^\circ\text{C}$. Pro eliminaci teplotní setrvačnosti vzorku (hystereze naměřených hodnot) na konečné výsledky byl měřen vždy ohřev i ochlazování. Hodnoty deformace jsme zaznamenávali vždy po teplotním kroku $\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$ (rychlost ohřevu i ochlazování byla dána možnostmi pece a byla cca $2,5^\circ\text{C} / \text{min}$).

Vlivy chyb vstupující do měření

- Vliv příčné citlivosti:

Tento vliv způsobuje chybu menší než 0,3%, proto ho lze zanedbat.

- Vliv zdánlivé teplotní deformace:

Pro přesné stanovení vlivu teploty a jeho následnou korekci uvádí výrobce u každého tenzometru jeho nominální teplotní charakteristiku, kterou je třeba brát při zpracování výsledků měření na vědomí.

MOŽNOSTI ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH ÚDAJŮ

Je zřejmé, že existuje více způsobů zpracování získaných dat. Hledaný koeficient teplotní roztažnosti α (směrnice závislosti) je možno počítat z různě širokých a různě umístěných teplotních intervalů. Například:

- **Okamžité koeficienty** teplotní roztažnosti:
$$\alpha_{i \div i+1} = \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{T_{i+1} - T_i} .$$

- **Celkové koeficienty** teplotní roztažnosti:
$$\alpha_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{T_i - T_0} .$$

Dalším způsobem sledování teplotního chování vzorku je využití **regrese**. Po odměření více bodů z teplotní závislosti vzorku lze s využitím software ovládajícím Gaussovu metodu nejmenších čtverců (např. *MS Excel*, *Matlab*, atd.) stanovit rovnice přímky či křivky, která měřenou závislost co nejlépe charakterizuje.

NÁVRH EXPERIMENTU

Po zkušenostech z praktického měření je možné stanovit obecný postup experimentálního stanovení koeficientu teplotní roztažnosti α obecného materiálu s využitím odporové tenzometrie. Jde o popis postupu, který jsme ověřili celou řadou experimentů.

Následující body shrnují podmínky, které musí splňovat jednotlivé části měřicího řetězce:

1) Vzorek: Musí mít dostatečnou velikost a vhodný tvar k instalaci minimálně jednoho (lépe dvou) tenzometrů, jednoho (lépe dvou) teploměrů a jejich svorkovnic. Vzorek by neměl vykazovat příliš velkou teplotní setrvačnost a jeho ohřev by měl být v celém objemu homogenní. Z toho vyplývá požadavek větší plochy při malém objemu. Ideálním tvarem se jeví například plochá destička o rozměrech $80 \times 50 \times 4$ mm.

2) Tenzometr: Pro snížení relativní chyby měření je vhodné zvolit tenzometr kompenzovaný pro materiál s co možná nejodlišnějším koeficientem teplotní roztažnosti. Pokud nelze získat vzorek odpovídajících rozměrů, je minimální velikost vzorku vázána na nejmenší tenzometry (např. tenzometr LY 0,6/120 firmy HBM má rozměry $5 \times 3,2$ mm).

3) Teploměr: Pro měření teploty je vhodný jakýkoliv přesný teploměr dostatečně malých rozměrů umožňujících instalaci na povrchu vzorku společně s jeho svorkovnicí. Výhodné jsou odporové teploměry (např. Pt 100), které je možno připojit přímo k aparatuře společně s tenzometry.

4) Způsob ohřevu: K ohřevu vzorku je možno použít jakýkoliv dostatečně silný zdroj tepla. Při výběru je třeba respektovat teplotní hranice použitelnosti tenzometru a teploměru udávané výrobcem. Při vlastním měření je žádoucí časově i prostorově rovnoměrný nárůst teploty vzorku. Ideální se jeví použití elektrické pece schopné dosáhnout teploty alespoň $T \approx 100^\circ\text{C}$.

5) Načtení a zpracování dat: Je vhodné sledovat hodnoty deformace vždy po určitém zvoleném teplotním kroku, který odpovídá velikosti celého intervalu ohřevu vzorku (např. při ohřevu $T = 20 \div 100^\circ\text{C}$ je dostatečný krok $\Delta T = 5^\circ\text{C}$). Celý teplotní interval by pak měl být pro přesnější měření široký alespoň 20°C (teplotní krok je pak třeba volit menší, např. $\Delta T = 2^\circ\text{C}$). S rostoucí šířkou celkového intervalu samozřejmě stoupá přesnost měření. Je též vhodné sledovat jak ohřev, tak i ochlazování vzorku. Naměřené hodnoty je poté nutné korigovat na hodnoty skutečné teplotní deformace materiálu vzorku a ty pak zpracovat alespoň jedním z uvedených způsobů:

- ☐ okamžité koeficienty teplotní roztažnosti
- ☐ celkové stupňovité koeficienty
- ☐ lineární, případně polynomická regrese

ZÁVĚR

Z našeho měření vyplynulo, že tento experiment lze použít už na poměrně úzkém teplotním intervalu bez rizika velkých chyb. Z analýzy chyb je sice zřejmé, že se zmenšující se šířkou celkového teplotního intervalu celková odchylka hledaného koeficientu narůstá, v praxi však již při teplotním kroku $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ docházelo k poměrně vyrovnaným výsledkům se směrodatnou odchylkou menší než 2% z výsledné průměrné hodnoty.

Teplotní roztažnost všech měřených vzorků bylo možno prohlásit za lineární a výsledky jednotlivých měření jednoho vzorku byly velmi podobné. Experiment tedy vedl k výraznému zpřesnění obecných tabelovaných hodnot.

LITERATURA

- [1] *Hoffman, K.*: An Introduction to Measurements using Strain Gages, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989
- [2] *Callister, D.*: Materials Science and Engineering: An Introduction, John Wiley & Sons, Utah, 1999
- [3] *Řezníček, J.*: Praktická aplikace tenzometrie - návrh studijního textu, Fakulta strojní ČVUT v Praze, Praha, 2000 – 2003

PŘÍLOHA

Tabulka výsledných vztahů charakterizujících teplotní roztažnost vzorku „ocel“:

Metoda zpracování	Výsledný vztah $[\mu\text{I}]$
Okamžité koeficienty	$\varepsilon_{mat} = 12,191 \cdot \Delta T$
Celkové stupňovité koeficienty	$\varepsilon_{mat} = 12,182 \cdot \Delta T$
Lineární regrese	$\varepsilon_{mat} = 12,107 \cdot \Delta T$
Regrese polynomem druhého stupně	$\varepsilon_{mat} = 12,032 \cdot \Delta T + 0,000705 \cdot \Delta T^2$