

METODIKA MĚŘENÍ TENZOMETRY M A M , V I S H A Y D O T E P L O T - 5 0 ° C .

Ing. Otakar Weinberg, k.p.Škoda, ÚVZÚ-VS, Plzeň

Problematika tenzometrického měření do teplot -50°C byla vyvolánou praktickou potřebou zjišťování namáhání na elektrických lokomotivách vyvíjených pro BAM (Bajkalsko-Amurskou Magistrálu) závodem EL, podniku Škoda. Při vývoji lokomotivy pro BAM se kromě základních otázek odolnosti materiálů při teplotách okolo -50°C uvažovalo i o měření za jízdy. Důvodem k měření na trati za těchto teplot nebyla odlišná pevnost materiálu, ale to, že zmrzlá trať způsobuje zvýšené namáhání podvozků. Pro případ takového měření bylo nutno vypracovat metodiku statického i dynamického tenzometrického měření za těchto nízkých teplot.

Dojde-li během zatěžování měřené součásti s tenzometrem, zapojeným do jedné větve můstku i ke změně její teploty, přičítá se ke skutečnému poměrnému prodloužení ϵ , měřenému tenzometrem, ještě zdánlivé ϵ_z . Jeho hodnota je dána výrazem

$$\epsilon_z = \left[\frac{B_G}{K} + (S - G) \right] \Delta T \quad [\mu\text{m}/\text{m}] \quad (1)$$

ϵ_z [μm/m] .. zdánlivé poměrné prodloužení naměřené tenzometrem s mřížkou z materiálu roztažnosti "G" na součásti z materiálu roztažnosti "S"

K [1] .. citlivost tenzometru udané výrobcem (k-faktor)

B_G [$10^{-6}/\text{grad}$] .. "charakteristika" součinitele změny odporu materiálu mřížky

G, S [$10^{-6}/\text{grad}$] .. "charakteristiky" součinitelů roztažnosti materiálu mřížky a součásti

ΔT [grad] .. rozdíl ($T - T_0$)

$T_i T_o$ [grad] .. uvažovaná (změněná) teplota a původní (referenční) teplota.

Výraz pro závislost ϵ_z na teplotě představuje díky všem nelineárním členům závislým na teplotě, křivku, která se mění pro každou kombinaci materiálů mřížky a součástí. Při vhodné volbě materiálů, resp. vhodném tepelném zpracování folie mřížky, lze dosáhnout průběhů, které v diagramu T, ϵ jednou či dvakrát protínají osu T ($\epsilon = 0$) a jsou poblíže průsečíku ploché. Toho pak lze použít k samokompensaci: chyba ϵ_z vlivem rozdílu teplot aktivního tenzometru a vyvažovacího tenzometru je v určitém rozsahu malá.

Ačkoliv většina světových výrobců tenzometrů vyrábí nyní běžně samokompenzační tenzometry, pravděpodobně nejrozsáhlejší sortiment dodává na trh americká firma Measurements Group, Inc (M-M, Vishay) prakticky každý z mnoha typů jejich foliových tenzometrů je vyráběn jako samokompenzační pro základní materiály (ocel, nerez ocel, hliník). Většinu lze objednat jako samokompenzační pro celou řadu kovů i nekovů (přehled ve firemní literatuře). Výrobce však v zásadě vystačí z dvěma materiály mřížky konstantanem (Advance) a chromniklem (KARMA) u nichž požadovaného přizpůsobení roztažnosti různých materiálů dosáhne vhodným žitím folie mřížky v průchozí elektrické peci. Tepelné zpracování je většinou voleno tak, aby křivka byla nejplyšší (případně protínala osu $\epsilon = 0$) v blízkosti pokojové teploty tj. okolo 24°C .

Každý tenzometr M-M, Vishay má ve svém 12-místném označení obsahující veškeré informace o něm, druhá dvě místa vyhrazena pro STC - číslo, značící zaokrouhlené pro jakou roztažnost součástí je tenzometr v oblasti okolo 24°C necitlivý na změnu teploty. Příslušná skutečná křivka ϵ_z , kterou lze použít pro odečtení opravy naměřeného ϵ je přiložena k balení tenzometrů. Jde zřejmě o experimentálně stanovený průběh z několika vzorků serie. Pro uživatele je udáno i matematické vyjádření opravy, získá-

né interpolační metodou.

$$\varepsilon_z = -51,6 + 2T - 0,022T^2 + 6,06 \cdot 10^{-5}T^3 - 3,89 \cdot 10^{-8}T^4 \quad [T(^{\circ}F)] \quad (2)$$

Přesunutí místa samokompensace lze dosáhnout záměrným použitím tenzometru samokompenzačního pro jiný materiál, jak plyne

$$\varepsilon_{z(G/S)} = \left(\frac{B_0}{K} - G \right) \Delta T + S \Delta T \quad (1.1.)$$

Je-li k dispozici tenzometr s STC číslem = G je pro něj na materiál o roztažnosti S1 naměřena křivka $\varepsilon_z(G/S1)$; chceme měřit na materiál o roztažnosti S2 a tudíž hledáme křivku $\varepsilon_z(G/S2)$

$$\varepsilon_{z(G/S1)} = \left(\frac{B_0}{K} - G \right) \Delta T + S1 \Delta T \quad (1.2.)$$

$$\varepsilon_{z(G/S2)} = \left(\frac{B_0}{K} - G \right) \Delta T + S2 \Delta T \quad (1.3.)$$

potom rovnice (1.3.) - (1.2.)

$$\varepsilon_{z(G/S2)} - \varepsilon_{z(G/S1)} = (S2 - S1) \Delta T \quad (3)$$

z rovnice (3) plyne, že křivka $\varepsilon_z(G/S2)$ je vlastně původní křivka $\varepsilon_z(G/S1)$, jejíž body jsou posunuty o hodnoty přímkově závislé na vzdálenosti ΔT . Pro $24^{\circ}C$ je $\Delta T =$

= 0 a křivky se tam tudíž protínají, jakoby šlo o bod otáčení. Transformovaná křivka není totožná s původní a jsouc pootočená se s ní nekryje. Pro uvažované měření v oblasti $0^{\circ} + -50^{\circ}C$ jsme použili tenzometry s mřížkou KARMA, samokompenzované pro nerez oceli (STC = 0,9). Použitím na uhlíkové oceli dojde k transformaci křivky ε_z , takže její plochá část se přesune do požadovaného rozsahu teplot. Rovnice pro tento případ je následující

$$\varepsilon_{z(0,9/6,7)} = \varepsilon_{z(0,9/9)} + (6,7 - 9,6) \cdot 10^{-6} \Delta T \quad (4)$$

Při přípravě experimentu byl dále vzat do úvahy vliv změny teplot přírodních vodičů na měřené ε . K posuvu nul, dochází u větších součástí, nebylo-li použito třídrátové zapojení, nebo jsou-li přívody k aktivním tenzometrům jiné

délky, než-li ke společnému kompenzačnímu tenzometru. Pro změnu čtení na můstku plyne

$$\varepsilon_{\text{MŮSTKU}} = \varepsilon + \varepsilon_{\text{TEPLoty}} \quad (5)$$

kde první člen představuje skutečnou poměrnou deformaci a druhý chybu změnou teploty vodičů. Změna se vztahuje k odporu tenzometru a k původní citlivosti K.

Souhrnný výraz pro teoretické stanovení možné chyby změnou teploty při měření je

$$\varepsilon_r = \frac{\rho \cdot L \cdot \alpha \cdot \Delta T}{K \cdot F \cdot R} \quad [\mu\text{m}/\text{m}] \quad (6)$$

z této rovnice plyne, že při měření na velkých součástkách v provozních podmínkách je výhodné použít tenzometrů co největšího odporu s nejkratšími a nejsilnějšími přívody. Je výhodné použít třídrátové zapojení s kompenzačním kusem připojeným dvojicí stejnosměrných vodičů.

Další teoretická úvaha se týkala přípravy tenzometrů v teplotních podmínkách (např. náhrada vadného tenzometru) při teplotách pod nulou. Naskytla se úvaha místního předhřevu tepným tělesem. Při této operaci se vyskytuje navlhnutí tenzometru, ale i místní roztahování ohřívajícího místa, čemuž brání okolní materiál. Vzniklé pnutí nesmí překročit dovolenou hodnotu meze kluzu, aby nedošlo k plastickému překročení. Předpokládá se kruhový zdroj, takže uvažovaný případ je obdobou prstence velkého průměru nataženého s přesahem na plném kotouči v němž je $\sigma_r = \sigma_t$.

$$\sigma = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{1 - \mu} \quad [MPa] \quad (7)$$

V experimentální části bylo sledováno:

- zvládnutí instalace tenzometrů typu SK a WK
- ověření statických vlastností uvažovaných snímačů
- ověření výrobcem udané citlivosti (k-faktoru) při běžné a snížené teplotě
- ověření posuvu oblasti samokompensace při snížených teplotách
- ověření dynamických vlastností
- ověření trvanlivosti instalace vytvrzené za tepla při cyklování
 - mřížovým napětím
 - střídavým napětím

- ověření trvanlivosti instalace vytvrzené za pokojové teploty při cyklování
 - střídavým napětím
- u tenzometrů předem přitmelených na planžetě bylo navíc ověřováno
- volba folie vhodných rozměrů pro typ SK
- zkouška statické únosnosti svarů a stability obdélníků folie těchto rozměrů za normální teploty a s tenzometry tuzemské výroby.
- příprava tenzometrů SK-09 na folie a přibodování na nosníky pro dynamickou zkoušku
- zkouška únosnosti a stability na takto připravených nosnících statickým ohybem za normální teploty.

Z výše popsaných částí teoretické a experimentální vyplývá následující:

Tenzometry typu SK a WK, vyrobené jako samokompenzační v oblasti $0 + 50^{\circ}\text{C}$ na sereze ocele, jsou použitelné v oblasti $+20 + -50^{\circ}\text{C}$ na uhlíkových ocelích (chyba u SK je 10 MPa a WK -25 MPa).

Dynamické zkoušky prokázaly, že instalace obou typů tenzometrů vydrží několik milionů kmitů míjivého napětí stříd.namáhání řádově kolem ± 70 (MPa) $+ \pm 200$ (MPa).

Nevýhodou tmelů AE 10 je pomalé tuhnutí za normální teploty (AE 15 je při vytvrzování za normální teploty ještě méně vhodný). Při vytvrzování je nutné mít tenzometry mírně zatížené (mírná nevýhoda) neb hrozí jejich ujetí. Tenzometry SK jsou svou charakteristikou velmi vhodné, ale nutno je mít v modifikaci s přívodními drátky. Snímače upravené jako přivařovací řeší úspěšně problém připevnění tenzometrů za podmínek nepřipouštějících normální tmelení. Statickým i dynamickým zatížením ověřena pevnost bodového spojení pro přenos deformace (± 187 MPa). Po $4+5 \cdot 10^6$ cyklech zatížení zjištěny směry v kontrolované dvojamplitudě (± 2 %). Posuv samokompenzace zůstává i u přivařovacích tenzometrů zachován i když charakteristika (chyba ε_a na teplotě) má poněkud jiný průběh (štíhlost planžety, tuhost přibodování). Z těchto poznatků plyne, že byla stan-

vena vhodná metodika pro samokompenzované měření na konstrukční oceli, v oblasti teplot $+20 + -50^{\circ}\text{C}$. Je vhodné použít tenzometr SK-09 samokompenzační pro austenitickou ocel natmelený na planžetu a na vlastní součást je připevněn bodováním. V řešeném místě je vhodné upravit dostatečně velkou rovinnou plošku pro tenzometr.

Literatura:

- /1/ MM Techn.note TN-128-2
- MM Bulletin A-142
- MM Bulletin B-136
- MM Bulletin B-157-3
- 2. Havlík J., Weinberg O.: Vývoj metodiky měření samokompenzačními odporovými tenzometry za teplot do -50°C , výzkumná zpráva, 1985.