EAN '96

34th Conference of Experimental Stress Analysis
34. konference o experimentální analýze napětí
3. - 6.6. 1996, Plzeň, Czech Republic

ANALÝZA FAKTORŮ OVLIVŇUJÍCÍCH PŘESNOST MĚŘENÍ SIL VE SLOUPECH LISU PŘI APLIKACI POLOVODIČOVÝCH TENZOMETRŮ

ANALYSIS OF FACTORS THE ACCURACY OF THE FORCES MEASSUREMENT ON EXTRUSION PRESS USING THE SEMI-CONDUCTOR STRAIN GAUGES DEPENDS ON

Růžička M., Řezníček J.

This paper describes using of semi-conductor strain gauges by the meassurement experimental assessment of both stress and strain distributions in the horizontal extrusion press 16 MN. The influences of some factors (temperature changes, strain nonlinearity, resistance difference) on the accuracy of the strain meassurement are analysed. There are discused corrections of this factors by the meassurement and its influence on the force resultant position.

1. Úvod

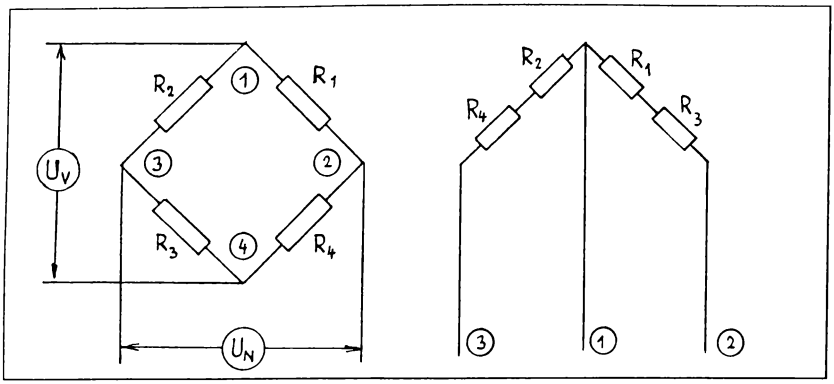
Příspěvek navazuje na referát doc. Ing. J. Michalce, CSc.: „Experimentální analýza silových a deformačních poměrů u vytlačovacího lisu" [1], který popsal princip měření sil (a deformací) ve sloupech lisu při výrobě trubek a vyhodnocení působiště výslednice těchto sil, které ovlivňuje lisovací poměry. Z důvodů dosažení dostatečné přesnosti při měření poměrně malých tahových deformací sloupů lisu, bylo použito polovodičových tenzometrů.

2. Charakteristiky polovodičových tenzometrů

Při řešení úlohy byly použity křemíkové odporové tenzometry typu AP120-6-12 výrobce *Výroba tenzometrů a snímačů, Zlín*. Pro měření tahových deformací bylo zvoleno zapojení do půlmůstku se sériovým řazením aktivních tenzometrů v jedné větvi můstku a kompenzačních tenzometrů ve druhé větvi, viz obr.1b. Zároveň byla snímači PT100 měřena teplota v blízkosti tenzometrů. Teplota při měření nepřesahovala 60 °C. Výrobce uvádí tyto základní vztahy pro deformační a teplotní odporovou závislost křemíkových tenzometrů

$$R_{\varepsilon,25} = R_{0,25}(1 + C_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \varepsilon^2) \tag{1}$$

$$R_{0,t} = R_{0,25} + \frac{A}{100}(T - 25) \tag{2}$$



Obr. 1 Schémata zapojení a číslování odporů

kde $R_{0,25}$ [Ω] je odpor volného tenzometru při 25 °C
$R_{\varepsilon,25}$ [Ω] je odpor deformovaného tenzometru při 25 °C.

Konstanta citlivosti C_1 je však závislá rovněž na teplotě podle vztahu

$$\overline{C}_1 = C_1 + C_1 \frac{B}{100}(T-25) \tag{3}$$

Jmenovitý odpor tenzometru $R_{0,25}$, a konstanty A, B, C_1, C_2 jsou udávány výrobcem podle výsledků kalibračních měření. U námi aplikovaných tenzometrů (celkem 37 kusů) byly výrobcem udávané hodnoty pro rozsah teplot +10 až +60 °C v následujícím rozsahu hodnot:

$R_{0,25}$ = 122,3 až 124,1 [Ω]
A = 0,043 až 0,074 [%/°C]
B = -0,14 až -0,16 [%/°C]
C_1 = 119,6 až 129,9 (± 2%)
C_2 = 3790 až 4230 (± 8%)

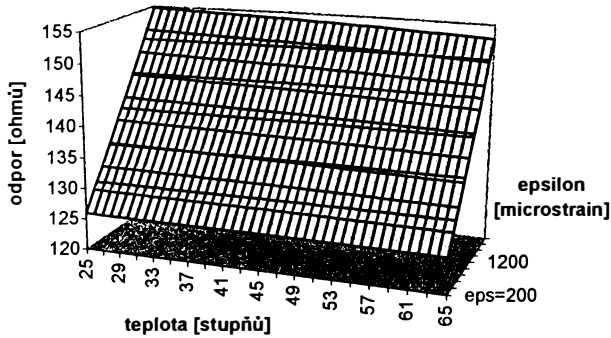
Dosazením rovnice (2) do (1) s uvážením vztahu (3) dostáváme odpor tenzometru při měřené teplotě a deformaci

$$R_{\varepsilon,T} = \left[R_{0,25} + \frac{A}{100}(T-25)\right] \cdot (1 + \overline{C}_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \varepsilon^2) \tag{4}$$

Je zřejmé, že s rostoucí teplotou je snižování deformační citlivosti aproximováno (v uvedeném rozsahu teplot) lineární závislostí a růst odporu s deformací je aproximován parabolickou funkcí. Jak vyplývá z vykresleného průběhu závislosti (4) v **obr.2**, je teplotní citlivost výrazně nižší oproti citlivosti deformační a ani nelinearita průběhu deformační závislosti není velká.
Z totálního diferenciálu výrazu (4) odvodíme vztah

$$\frac{\Delta R}{R_{0,25}} = \left(1 + \frac{1}{R_{0,25}} \frac{A}{100}(T-25)\right) \cdot (\overline{C}_1 + 2C_2 \cdot \varepsilon) \cdot \varepsilon + \left(\frac{1}{R_{0,25}} \frac{A}{100}\left(1 + \overline{C}_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \varepsilon^2\right)\right) \cdot \Delta T = \tag{5}$$

$$= K_{\varepsilon,T} \cdot \varepsilon + K_{\Delta T} \cdot \Delta T$$



Obr. 2 Závislost změny odporu na teplotě a na deformaci

kde $K_{\varepsilon,T}$, $K_{\Delta T}$ jsou dílčí funkce citlivosti na deformaci a změnu teploty během měření. Výrobce zavádí deformační a teplotní citlivosti tenzometru $K_{\varepsilon,25}$ a $K_{0,T}$, které vyjadřují závislost poměrné změny odporu měřením při konstantní normové teplotě 25 °C nebo naopak při nulové deformaci a dané teplotě prostředí (opět konstantní), jak je obdržíme z prvního sčítance rovnice (5)

$$K_{\varepsilon,25} = (C_1 \cdot +2C_2 \cdot \varepsilon\ )$$

$$K_{0,t} \equiv \overline{C}_1 = C_1 + C_1 \frac{B}{100}(T-25) \qquad (6)$$

Nemění-li se teplota během měření, bude druhý sčítanec výrazu (5) nulový, avšak absolutní hodnota teploty nadále ovlivňuje jak jmenovitý odpor tenzometru, tak jeho zesílení (funkci $\overline{C}_1$).

3. Vliv faktorů na přesnost měření

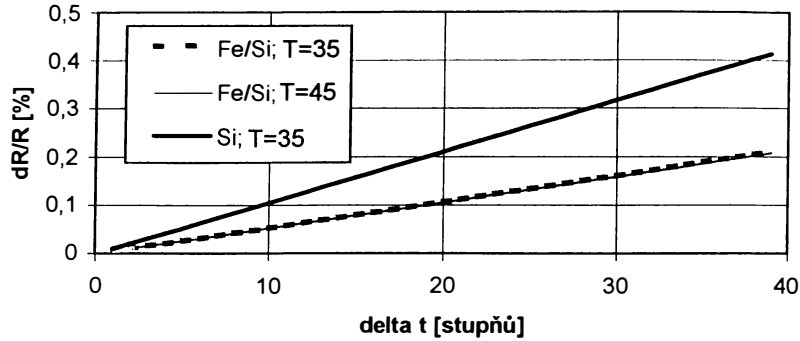
Ovlivnění přesnosti měření charakteristikami křemíkových odporových tenzometrů je obecně známé a bylo publikováno např. ve [2], [3]. Zde se budeme zabývat několika konkrétními vlivy, a jejich dopadu na přesnost určování sledovaného parametru lisu, tj. polohy výslednice lisovací síly.

3.1 Rozdílná teplotní roztažnost křemíkového tenzometru a měřené součásti

Součinitel teplotní roztažnosti křemíku je α_{Si}=4.10^{-6} a je nižší, nežli u oceli (α_{Fe}=11,5.10^{-6}). V důsledku toho vzniká přírůstek odporu nalepeného tenzometru, který je dán druhým členem rovnice (5) při zdánlivé deformaci $\varepsilon = (\alpha_{Fe} - \alpha_{Si}) \cdot \Delta T$. V **obr.3** je vynesena poměrná změna odporu a chyba vznikající při zanedbání tohoto vlivu pro různé hodnoty teploty instalace tenzometru T a velikost ohřevu ΔT. Je zřejmé, že vliv instalační teploty i chyba případným ohřevem, (během měření nepřesáhl 2 až 3 °C) je zanedbatelný.

3.2 Vliv zapojení tenzometrů do můstku

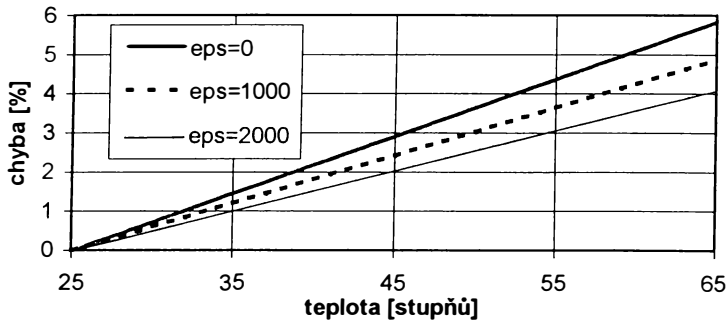
Pro zapojení do Wheatsonova můstku podle **obr.1a** platí známá můstková rovnice pro měřený signál M:



Obr. 3 Změna odporu vlivem rozdílné teplotní roztažnosti

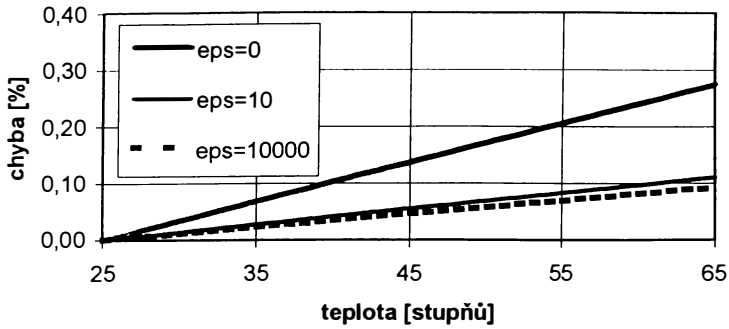
$$M \equiv \frac{U_V}{U_N} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_4 + \Delta R_4} - \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_2 + \Delta R_2 + R_3 + \Delta R_3} \tag{7}$$

Z důvodů teplotní závislosti jmenovitého odporu tenzometru při měření vzniká při **čtvrtmůstkovém** zapojení ($R_2 = R_3 = R_4$) chyba, kterou je nutno kompenzovat. Dosazením za ΔR podle vztahu (5) do můstkové rovnice (7) a vyjádřením relativní chyby vůči jmenovité teplotě t=25 °C dostáváme závislost podle **obr.4.** Je patrné, že chyba měřené deformace sloupů by byla významná, což v řešení našeho problému již vede významné odchylce souřadnice těžiště od skutečné hodnoty (viz. obr.7).



Obr. 4 Chyba při čtvrtmůstkovém zapojení, bez početní korekce výsledků

Při **půlmůstkovém** zapojení s využitím kompenzačního tenzometru stejného jmenovitého odporu avšak rozdílných teplotních konstant A, B a C se chyba výrazně snižuje (zejména při vyšších hodnotách signálu). Pro výše uvedený max. rozdíl v konstantách používaných tenzometrů je tato závislost na **obr.5.** Je zřejmé, že tato chyba je pro běžná měření zanedbatelná.



Obr. 5 Chyba při kompenzovaném půlmůstkovém zapojení vlivem odlišných konstant

3.3 Vliv rozdílného jmenovitého odporu tenzometrů v můstku

Při použití dvou aktivních tenzometrů měřících tahové deformace sloupů lisu a při **půlmůstkovém** zapojení, bylo řazení odporů sériové, podle **obr.1b.** Protože se od sebe liší rovněž jmenovité odpory aktivních tenzometrů, je třeba toto uvážit v můstkové rovnici. Za předpokladu, že $\Delta T=0$ a $T=25$ °C platí pro měřený signál M sériově řazených tenzometrů

$$M = \frac{1}{2}\frac{(\overline{C}_{11} + 2C_{21}\cdot\varepsilon\,)R_1\cdot\varepsilon + (\overline{C}_{13} + 2C_{23}\cdot\varepsilon\,)R_3\cdot\varepsilon}{\left(1+\overline{C}_{11}\cdot\varepsilon + C_{21}\cdot\varepsilon^2\right)R_1 + \left(1+\overline{C}_{13}\cdot\varepsilon + C_{23}\cdot\varepsilon^2\right)R_3} \tag{8}$$

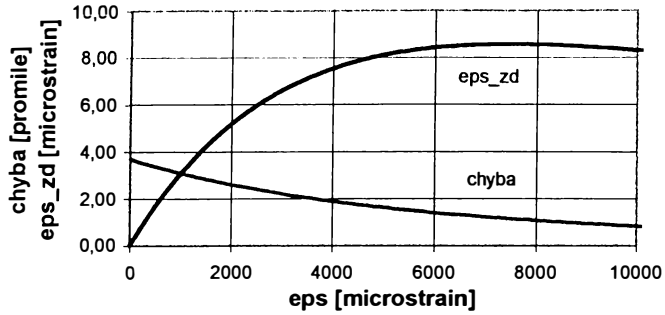
Dostáváme tak kvadratickou rovnici pro hledanou deformaci ε s koeficienty:

$$\begin{aligned} &A\cdot\varepsilon^2 + B\cdot\varepsilon + C = 0 \qquad \text{kde} \qquad A = 2\cdot\left(R_1 C_{21} + R_3\cdot C_{23}\right)\cdot(1-M) \\ &B = \left(R_1 C_{11} + R_3\cdot C_{13}\right)\cdot(1-2M) \;\; ; \;\; C = -2M\left(R_1 + R_3\right) \end{aligned} \tag{9}$$

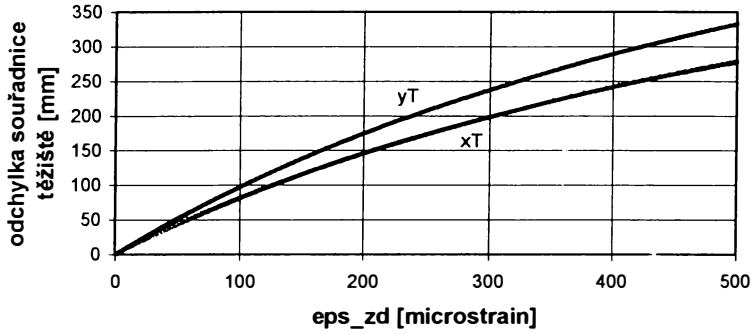
Velikost zdánlivého prodloužení resp. chyby, která by vznikla při neuvažování odlišných odporů sériově řazených tenzometrů ukazuje **obr.6**.

3.4 Vliv popsaných chyb na polohu působiště lisovací síly

Jak bylo popsáno v již zmíněném příspěvku [1] z naměřených tahových deformací sloupů je určována výsledná lisovací síla a souřadnice x_T, y_T jejího těžiště. Při uvažování výše popsaných kompenzací teploty při měření, odlišných citlivostí tenzometrů a rozdílnosti jejich odporů lze předpokládat chybu měření podle přesnosti aparatury (tenzometrická ústředna DMC-Plus, HBM) v rozsahu ±1 microstrain. Při maximální lisovací síle 16 MN by tak odchylka souřadnic těžiště neměla přesáhnout ±1,1 mm. Pokud by však nebyly uvažovány popsané vlivy a mezi skutečnou a měřenou hodnotou by vznikl rozdíl o velikosti zdánlivého prodloužení ε_{zd} (eps_zd) dosahuje odchylka řádově větších hodnot, jak ukazuje **obr.7**. Nekorigované hodnoty měřeného signálu by byly pro vyhodnocení měření nepoužitelné.



Obr. 6 Chyba a zdánlivé prodloužení při různých odporech tenzometrů v sérii



Obr. 7 Závislost odchylky souřadnic těžiště lisovací síly na přírůstku zdánlivého prodloužení

Literatura:

[1] MICHALEC, J., RŮŽIČKA, M.: Experimentální analýza silových a deformačních poměrů u vytlačovacího lisu. In: Sborník konference EAN, Plzeň, 1996.

[2] HRUBANT,L. KOZÁK,K.:Rozdílná spolehlivost výsledků získávaných při EAN strojních částí kovovými a polovodičovými tenzometry. In: 30. konference EAN , Praha, KRES 1992.

[3] HRUBANT,L. KOZÁK,K.: Využití specifických vlastností křemíku ke zvýšení přesnosti a spolehlivosti EAN uskutečněné tenzometrickými odporovými tenzometry. In: 22. konference EAN, Holany, VZLÚ Praha, 1984.



Ing. Milan Růžička, CSc., Ing. Jan Řezníček, CSc.
ČVUT Fakulta strojní, Katedra pružnosti a pevnosti,
Technická 4, 166 07 Praha 6
tel.:(02) 2435 2512, fax: (02) 329386, e-mail: RUZICKA@fsinet.fsid.cvut.cz