

VYUŽITÍ SPECIFICKÝCH VLASTNOSTÍ KŘEMÍKU K ZVÝŠENÍ  
PŘESNOSTI A SPOLEHLIVOSTI EXPERIMENTÁLNÍ ANALYSY  
NAPJATOSTI USKUTEČNĚNÉ KŘEMÍKOVÝMI ODPOROVÝMI TENZOMETRY

Ing. Ladislav Hrubant, Karel Kozák,  
Výzkumný a zkušební letecký ústav, Praha

Referát pojednává o určení deformační citlivosti křemíkových tenzometrů již nalepených na měřený objekt, a to z teplotní závislosti odporu tenzometrů před nalepením a po nalepení na měřený objekt. Přesná reprodukovatelnost teplotní závislosti odporu nalepených tenzometrů po skončeném měření pak je zárukou spolehlivosti instalace křemíkových tenzometrů během celého měření. Uvedené postupy se začínají využívat ~~při měřeních na pevnostně neexponovaných částech československého turbovrtulového motoru.~~

### 1. ÚVOD

Při porovnávání křemíkových tenzometrů s tenzometry metalickými uvádějí všichni autoři jako nevýhodu křemíkových tenzometrů výraznou závislost jejich charakteristik na teplotě. Téměř všichni autoři však opominají uvést, že tyto teplotní závislosti charakteristik křemíkových tenzometrů jsou velmi přesně reprodukovatelné. Závislost elektrického odporu běžných typů křemíkových tenzometrů se nalepením na měřené objekty z běžných typů kovových i nekovových materiálů obvykle dosti výrazně zvětší. Je to důsledek malé teplotní roztažnosti křemíku, která je zlomkem teplotní roztažnosti těchto běžných typů materiálů. Teplotní závislost odporu nalepených tenzometrů je na většině měřených objektů možné opakovanými teplotními cykly stabilizovat tak, že je reprodukovatelná s vysokou přesností. Přesnou reprodukovatelnost této závislosti je pak možné využít k zpřesnění hodnoty deformační citlivosti křemíkových tenzometrů po jejich nalepení na měřený objekt.

## 2. PODSTATA ZPŮSOBU URČENÍ DEFORMAČNÍ CITLIVOSTI KŘEMÍKOVÝCH TENZOMETRŮ NALEPENÝCH NA MĚŘENÉM OBJEKTU

Určení hodnoty deformační citlivosti křemíkových tenzometrů po jejich nalepení na měřený objekt je umožněno poměrně značnými rozdíly mezi teplotní roztažností křemíku a teplotní roztažností běžných kovových i nekovových materiálů měřených objektů. Číselné údaje jsou uvedeny v následující tabulce.

| Materiál                   | Stř.hodnota<br>součinitele<br>teplotní<br>roztlačnosti<br>materiálu<br>$\alpha_M$<br>$\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ | Křemíkový tenzometr<br>s odporem 120 ohmů a K-faktorem +120<br>je nalepen na objektu z materiálu<br>uvedeného v prvním sloupci;<br>ohřev měřeného objektu z 25°C na 35°C<br>způsobí<br>relativní deformaci<br>tenzometru<br>$(\alpha_M - \alpha_{Si}) \times 10^6$ |       |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
|                            |                                                                                                                                    | změnu odporu<br>v důsledku deformace<br>ohm                                                                                                                                                                                                                        |       |
| křemík                     | 4                                                                                                                                  | 0                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0     |
| konstrukční<br>ocel        | 11                                                                                                                                 | $7 \cdot 10^{-5}$                                                                                                                                                                                                                                                  | +1,01 |
| nerezavějící<br>ocel 12%Cr | 10,5                                                                                                                               | $6,5 \cdot 10^{-5}$                                                                                                                                                                                                                                                | +0,94 |
| slitiny Ti                 | 8,5                                                                                                                                | $4,5 \cdot 10^{-5}$                                                                                                                                                                                                                                                | +0,65 |
| slitiny Al                 | 22                                                                                                                                 | $18 \cdot 10^{-5}$                                                                                                                                                                                                                                                 | +2,59 |

V posledním sloupci tabulky jsou uvedeny odporové změny tenzometrů způsobené deformací, která je důsledkem rozdílu teplotních roztažností křemíku a uvedených materiálů. Křemíkové tenzometry mají i v nenalepeném stavu elektrický odpor závislý na teplotě. Při ohřevu z 25°C na 35°C odpor nenalepeného tenzometru uvedeného typu vzroste o 0,95 ohmu.

Z uvedeného vyplývá, že při známých průbězích závislosti odporu křemíkového tenzometru nenalepeného a odporu křemíkového tenzometru nalepeného na měřeném objektu lze odečtením obou hodnot, pro určitý rozdíl teplot, zjistit hodnotu odporové změny vyvolané rozdílem teplotních roztažností. Pro měření v širším teplotním rozmezí, ve VZLÚ byla uskutečněna měření při teplotách až do 250°C, je výhodné zjistit závislost odporu nalepených a nenalepených tenzometrů na teplotě pro celé

toto rozmezí teplot.

Reprodukovatelnost teplotních závislostí odporu u dobře stabilizovaných titanových a ocelových částí před měřením a po něm byla obvykle v mezích  $\pm 0,15$  ohmu, což s uvedeným typem křemíkového tenzometru odpovídá nepřesnosti relativní deformace  $\pm 1,05 \cdot 10^{-5}$ . Jen pro názornost u kovových tenzometrů odpovídá tato hodnota deformace změnám odporu v mezích  $\pm 0,0024$  ohmu.

Protože součinitel teplotní roztažnosti je materiálovou konstantou, je při uvedené reprodukovatelnosti teplotní závislosti odporu nalepených tenzometrů určení K-faktoru nalepených tenzometrů poměrně přesné, zejména na součástech z ocelí a hliníkových slitin. Pro dosažení potřebné přesnosti měření je účelné v bezprostřední blízkosti tenzometru současně sledovat teplotu buď termočlánkem, nebo křemíkovým odporovým teploměrem nalepeným v bezprostřední blízkosti tenzometru. Při tloušťkách podložních vrstev 0,01 mm až 0,03 mm, jaké se docilují s čs.tenzometrickým lepidlem PT-8, je vliv teplotní roztažnosti lepidla zanedbatelný. U tenzometrických lepidel s vyšší viskozitou, na př. EP 250 fy. Hottinger, kdy podložní vrstvy mají tloušťku větší než 0,05 mm, začíná být vliv teplotní roztažnosti lepidlové vrstvy již měřitelný. Vliv tloušťky vrstvy lepidla na přesnost odvození deformační citlivosti nalepeného křemíkového tenzometru, z jeho teplotní závislosti odporu, bude zjišťován u tenzometrů nalepených na křemíkových deformačních členech.

### 3. ZÁVĚR

Křemíkové tenzometry, vyvinuté autory a vyráběné v OPS Gottwaldov, jsou již několik let využívány v n.p.Motorlet i ve VZLÚ k měření dynamického i statického namáhání pevnostně nejexponovanějších částí turbovrtulového motoru až do 40.000 ot/min a umožnily významně zpřesnit tato měření. Průměrná změna odporu tenzometru o 12 ohmů s každou promílí měřené deformace odstraňuje problémy se sledováním přechodových odporů kroužků přenášejících signál do měřicího řetězce. Lepení tenzometrů na součásti pomocí lepidel vytvrzujících za vyšších umožňuje měřit i v oblasti pružněplastických deformací.

---