

Radomil Zimmerhahl
ŠKODA PÍZEN

NĚKOLIK POZNÁMEK K PROBLEMATICE
TENZOMETRICKÉHO MĚŘENÍ ZA VYSOKÝCH TEPLOT

Autor předkládá své zkušenosti z vývoje metodiky měření napjatosti na vnějších tělesech turbíny 500MW. K měření byly použity tenzometry FNW-FB-6-50-12 fy BIH. Jedná se o přivařovací tenzometr, použitelný pro měření v rozsahu teplot -270 až 540°C. Plný tenzometrický můstek, který tvoří čtyři fóliové tenzometry, z nichž každý má odpor 120Ω, je přilepen keramickým lepidlem k ocelové podložce o tloušce 0,13mm. Dva z tenzometrů, umístěné v podélném směru, tvoří aktivní vinutí, zbývající dva jsou kompenzační. Snímač je vyráběn jako samokompenzační pro koeficient tepelné roztažnosti $12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. K-faktor má hodnotu 3,5 (pro plný most), max. statická deformace je $\pm 0,5\%$.

Při měření na tělese parní turbíny bylo nutno počítat s max. teplotou okolo 450°C, rychlost změny teploty při najíždění bloku se očekávala asi 2°C/min, při najíždění ze studeného stavu se teplota mění přibližně v rozsahu 400°C, při najíždění po kratší odstavce je rozsah teplot podstatně menší. Rychlost změny deformace a frekvence deformace je poměrně malá. Jednalo se tedy v podstatě o statické měření v nestacionárním teplotním poli s relativně malými rychlostmi změny teploty, s dosti vysokou hladinou max. teploty. Dlouhodobá měření při této teplotě jsou velmi obtížná. Velkou pozornost bylo třeba věnovat otázkám dlouhodobé stability snímačů, teplotní kompenzace teplotní charakteristice. Údaje výrobce jsou v těchto otázkách velmi omezené. Z toho důvodu bylo třeba zjistit vlivy jednotlivých faktorů pro konkrétní snímač a materiál. Byly zhotoveny vzorky z materiálu měřených těles a vedle běžných mechanických hodnot byly zjištěny závislosti modulu pružnosti a koef. tepelné roztažnosti na teplotě. Charakteristiky sní-

mačů byly zjišťovány na creepovém stroji, kde na zkoušený vzorek namáhaný prostým tahem byly instalovány vždy čtyři tenzometry a v jejich těsné blízkosti dva termočlánky, neboť údaj o poměrné deformaci je bez znalosti teploty v místě měření prakticky bezcenný. Tato instalace byla několikrát opakována, takže celkem bylo použito při zkouškách 16 tenzometrů. Kolem vzorku byla umístěna elektrická pírka a teplota vzduchu uvnitř pece byla regulována. Dala se též měnit rychlost ohřevu změnou napětí na vinutí pece.

V první řadě byl ověřován K-faktor snímačů a zjišťována jeho závislost na teplotě. Z počátku byly výsledky velmi špatné. Několikrát opakovaním instalace bylo dokázáno, že výrobcem uváděná hodnota K-faktoru 3,5 je snad dosažitelná zlepšováním drsnosti povrchu až do zrcadlového lesku. Ve ztížených podmínkách na elektrárně je však reálně dosažitelná hodnota při 20°C $3,13 \pm 3\%$. Přesným dodržením podmínek přípravy povrchu i přivařování lze docílit reprodukovatelnosti této hodnoty. S rostoucí teplotou se hodnota K-faktoru snižuje, jak ukazuje obr.1, a při 500°C je cca o 10% nižší.

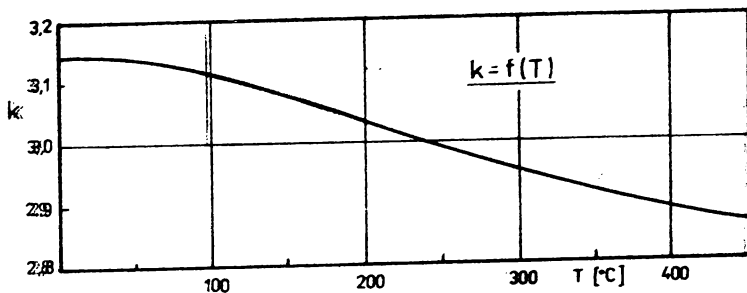
Experimentální vyšetření teplotní charakteristiky snímačů bylo provedeno na nezatíženém vzorku, který byl ohříván v elektrické peci teplým vzduchem. S ohledem na měření v nestacionárním teplotním poli, byla určena teplotní charakteristika nejen pro ustálený teplotní režim, ale též při rychlostech ohřevu 2,5, 7,5 a 10°C/min (obr.2). Vlivem rozdílné teploty vinutí a povrchu měřené součásti dostáváme pro každou rychlost zvláštní křivku. Pokud dodržíme relativní polohu termočlánku a vinutí tenzometru na měřené součásti jako při zjišťování teplotní charakteristiky a za předpokladu obdobného směru tepelného toku, můžeme zdánlivou deformaci během měření zjišťovat dle okamžité rychlosti ohřevu na příslušné křivce teplotní charakteristiky. Tento závěr byl ověřen několika experimenty, při kterých byl vzorek s tenzometry ohříván tím způsobem, že rychlost ohřevu byla měněna a na některých hodnotách byla teplota ustálena. Velikost zdánlivé deformace v každém okamžiku byla vždy dána příslušnou křivkou charakteristiky dle okamžité rychlosti změny teploty. Se stoupající teplotou

však velmi rychle klesá hodnota isolačního odporu snímačů. Je-li isolační odpor snímače při 25°C $5 \cdot 10^4 \text{ M}\Omega$, nemění se tato hodnota přibližně do 170°C , se vzrůstající teplotou však začne prudce klesat. Zatímco při teplotě 400°C je $10^2 \text{ M}\Omega$, při teplotě 500°C je již jen $6 \text{ M}\Omega$. Z toho důvodu je důležité kontrolovat při vlastním měření isolační odpory jednotlivých snímačů. Teplotní charakteristika se v první fázi zatěžování též mění v závislosti na počtu tepelných cyklů, které snímač prodělal. Zvláště výrazné je to u prvního cyklu, kdy by nemělo probíhat měření.

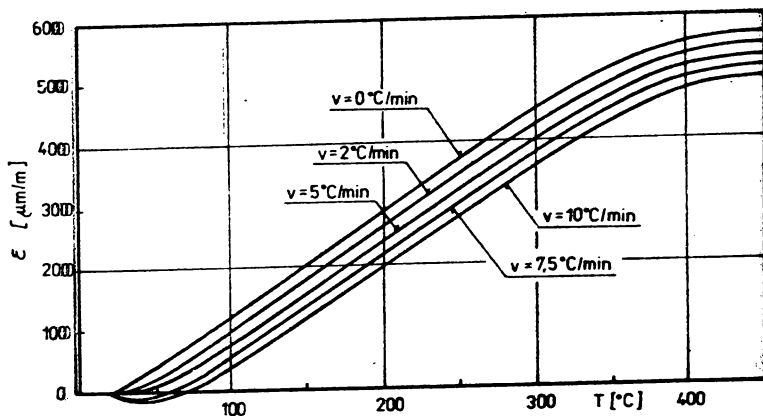
Velmi důležité je chování těchto snímačů při dlouhodobém působení teploty a deformace. Při teplotách nad 400°C dochází ke creepu tenzometrů a velikost zdánlivé deformace je funkcí teploty, deformace a času. Bylo vytvořeno celkem 20 creepových křivek, z nichž vyplynulo, že creep těchto snímačů je jevem přechodným, který vymizí po dostatečně dlouhém zatížení snímačů jak teplotou, tak deformací (obr.3). Zatěžování snímačů jen teplotou nemá v tomto směru žádoucí účinek. Délka doby resp. počet cyklů, nutných k odbourání creepu je závislá na výši teploty i deformace. Pro teplotu 500°C a deformaci nad $1000 \mu\text{m/m}$ je to řádově několik set hodin.

Dalším problémem byla ochrana snímače. Po rozsáhlých zkouškách bylo upuštěno od ochranného nátěru a tenzometr byl chráněn krytkou vylisovanou z pcelové fólie tloušťky $0,15 \text{ mm}$. Krytka byla a povrchu bodově přivařena. Celé měřené místo, tzn. dva tenzometry a termočlánek bylo překryto plechovou krabicí přivařenou na dvou patkách k povrchu tělesa.

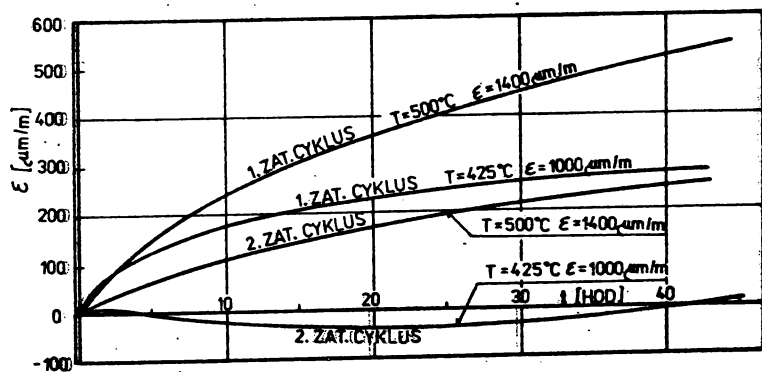
Odhad celkové chyby při tomto druhu měření je velmi obtížný. Jelikož neexistuje jiný způsob, kterým bychom získali měřené hodnoty, vycházeli jsme z přesnosti získaných charakteristik. Uvážíme-li, že při praktickém měření nebude turbína najíždět většinou ze studeného stavu, ale po kratší odstávce z teplot cca 250°C , budou nulové hodnoty tenzometrů změřeny při této teplotě. Potom lze očekávat, že v rozsahu teplot $250+450^{\circ}\text{C}$ nepřesáhne chyba měření deformace $\pm 80 \mu\text{m/m}$. Při najíždění ze studeného stavu bude chyba větší.



OBR. 1



OBR. 2



OBR. 3