

ZKOUŠKY TENZOMETRŮ V KRYOGENNÍCH TEPLOTÁCH

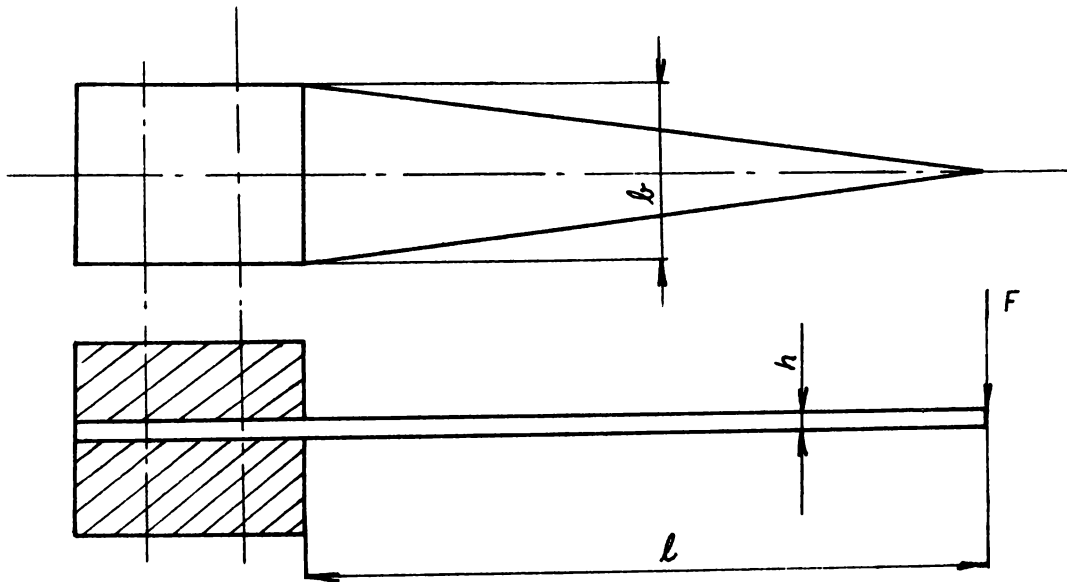
V příspěvku jsou uvedeny výsledky výběru a zkoušek tenzometrů při stupňovitém zatěžování přípravku za působení kryogenních teplot.

Před tenzometrickým měřením, které se uskutečňuje v extrémních podmínkách je nutné provést výběr vhodných tenzometrů a provést porovnávací zkoušky, které určí způsob kompenzace parazitních signálů a případnou korekci naměřených hodnot. Při požadavku výhledového měření supravodivých materiálů bylo třeba vyzkoušet vhodné tenzometry pro měření v kryogenních teplotách a při působení magnetického pole až do výše 7 tesla. Pro tyto zkoušky jsme měli k dispozici od zákazníka ETD Škoda Plzeň kryostat HK 200 se supravodivým magnetem.

Bylo třeba vyvinout zatěžovací zařízení, které by umožňovalo stupňovité zatěžování zkušebních nosníků s tenzometry. Tento přípravek byl konstrukčně omezen $\phi 40$ mm, který byl dán činným ϕ heliového kryostatu. Z důvodů rozměrových byl proto použit třístupňový vačkový mechanismus, který přes kladičky stupňovité zatěžoval dva protilehlé nosníky stejné pevnosti. Zatěžovací mechanismus byl upevněn k silnostěnné trubce o průměru 40 mm a otáčení vačky bylo realizováno pomocí tyče vedoucí vnitřkem trubky. Celý přípravek byl z důvodů pozdějšího použití v magnetickém poli vyroben z nerezové nemagnetické oceli (obr. 2).

Při výběru vhodných tenzometrů ke zkouškám bylo třeba vycházet s použitím při teplotě tekutého hélia -269 °C. Tomuto požadavku vyhověly z dostupných tenzometrů pouze tenzometry WK - 09- 100 BR - 350 firmy Micro Measurements - Vishay. Tyto tenzometry mají mřížku z chromniklové fólie v plastické hmotě, odpor 350Ω a pájecí ploché drátky. Jejich pracovní rozsah je pro statické měření od -269 °C do $+290$ °C. K lepení tenzometrů bylo použito tmelu M-Bond AE-15 od téže firmy. Tento dvousložkový tmel doporučuje výrobce až do teplot -269 °C. Po přilepení tenzometrů byl tmel vytvrzován po dobu šesti hodin na teplotě 50 °C. Jako ochranný nátěr proti vlhkosti byl použit Abdeckmittel NG 150 vhodný do nejnižších teplot vyrobený firmou Hottinger - Baldwin Messtechnik (HSR). Zkušební nosníky měly tvar nosníků stálé pevnosti, tloušťku $2,5$ mm a byly vyrobeny z oceli 17 246. Každý nosník byl olepen jedním tenzometrem na tahové a jedním tenzometrem na tlakové straně. Zapojení bylo provedeno třívodičově pomocí lanka s teflonovou izolací, které bylo vedeno vnitřkem přípravku do průchodky v horní části a odtud kabelem na svorkovnici mimo přípravek. Kompenzační tenzometry byly instalovány stejným způsobem na nosník, který nebyl v průběhu zkoušek zatěžován v přípravku. Jako přístroj na měření signálů tenzometrů byl použit čtyřkanálový statický můstek Manueli Kompenzátor firmy HBM.

V průběhu zkoušek přípravku došlo k zadírání otočné vačkové části, a proto bylo nutné vložit mezi třecí plochy teflonové pouzdro. Přípravek byl zkoušen při pokojové teplotě v laboratoři, byla ověřena jeho funkce a změřeny deformace zkušebních nosníků při třech zatěžovacích stupních. Pro účely výpočtu byl měřen průhyb nosníku $y_{\text{naměřen}}$ setinovým úhybkoměrem. Výpočet k-faktoru tenzometrů byl proveden dle následujících vzorců. $\epsilon_{\text{naměřen}}$ bylo korigováno v důsledku projevujícího se vlivu ohybu u tohoto tenkého nosníku.



$$k_{\text{TENZ}} = \frac{\epsilon_{\text{SKUT}} \cdot k_{\text{MŮSTKU}}}{\epsilon_{\text{VÝPOČTOVÉ}}}$$

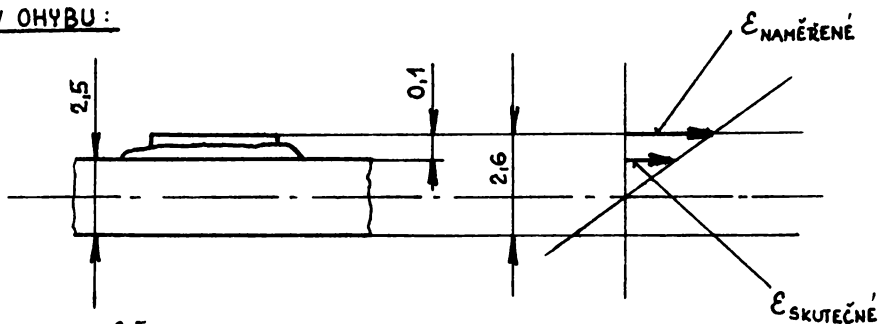
$$G = \frac{M_0}{W_0} = \text{KONST} = E \cdot \epsilon$$

$$G = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} = \frac{G \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2} = E \cdot \epsilon \quad F = \frac{\epsilon \cdot E \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot l}$$

$$y = \frac{G \cdot F \cdot l^3}{b \cdot E \cdot h^3} \quad y = \frac{G \cdot E \cdot \epsilon \cdot b \cdot h^2 \cdot l^3}{6 \cdot l \cdot b \cdot E \cdot h^3} = \frac{\epsilon \cdot l^2}{h}$$

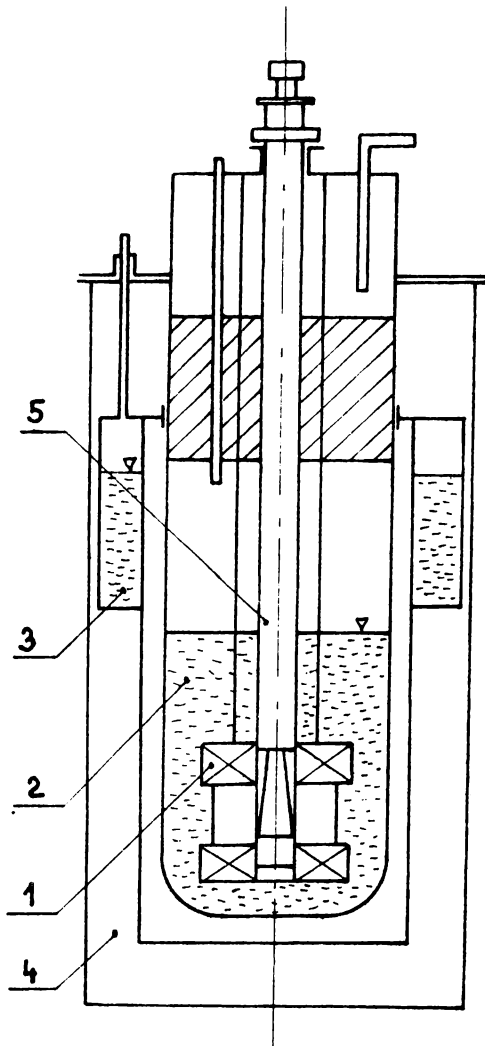
$$\epsilon_{\text{VÝPOČTOVÉ}} = \frac{y_{\text{NAMĚŘENÉ}} \cdot h}{l^2}$$

VLIV OHYBU:



$$\epsilon_{\text{SKUTEČNÉ}} = \frac{2,5}{2,6} \cdot \epsilon_{\text{NAMĚŘENÉ}}$$

OBR 1: SCHEMA KRYOSTATU HK 200

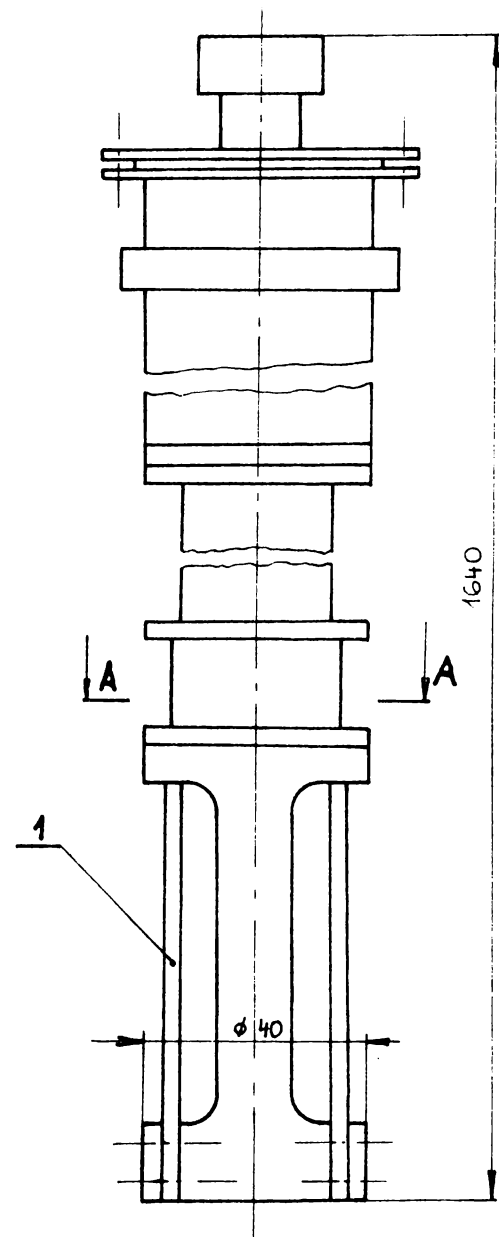
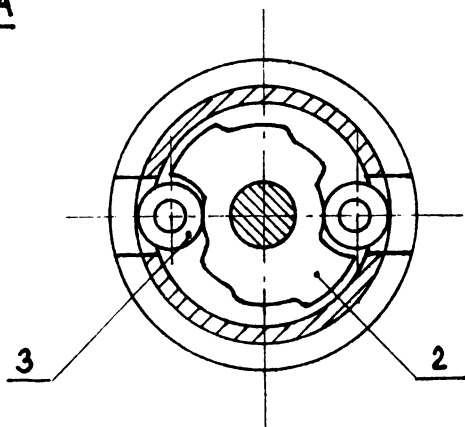


- 1 - SUPRAVODIVÝ MAGNET
- 2 - LHe VANA
- 3 - LN₂ VANA
- 4 - VAKUOVÝ IZOLAČNÍ PROSTOR
- 5 - PŘÍPRAVEK S TENZOMETRY

OBR 2 PŘÍPRAVEK PRO ZATĚŽOVÁNÍ
NOSNÍKŮ S TENZOMETRY

- 1 - NOSNÍK S TENZOMETRY
- 2 - ZATĚŽOVACÍ VAČKA
- 3 - KLADIČKA

A - A



Po ověření funkčnosti přípravku byla provedena zkouška tenzometrů při teplotě -195 °C a to ponořením přípravku do nádoby s tekutým dusíkem a postupným zatěžováním. Hlavní zkoušku tenzometrické instalace byla provedena v kryostatu HK 200 Ferox (obr. 1). Po předchlazení LN_2 byl vnitřní prostor kryostatu s přípravkem zalit zkapalněným héliem. Deformace při zatěžovacích cyklech byla naměřena lineární, návrat nul byl uspokojivý s velmi malou hysterezi. Naměřené a vypočtené hodnoty k-faktorů jsou uvedeny v tabulce 1 pro všechny měřené hodnoty. Uváděné hodnoty jsou získány zprůměrováním hodnot naměřených všemi čtyřmi tenzometry. Výrobce udávaný k-faktor pro teplotu 24 °C je $2,06 \pm 1\%$.

Tabulka 1: Naměřené a vypočtené hodnoty

Prostředí	Vzduch	LN_2	LHe
Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	+24	-195	-269
$\varepsilon_{\text{naměr.}}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	1183	1181	1186
$\varepsilon_{\text{vypoč.}}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	1137	1135	1140,5
k-faktor	2,052	2,049	2,059
směrodatná odchylka	0,0189	0,0140	0,0216

Z naměřených výsledků vyplývá, že zvolené tenzometry jsou vhodné pro měření v kryogenních teplotách a při měření materiálu 17 246 není třeba korigovat naměřené hodnoty, protože u tohoto materiálu vlivem změny modulu pružnosti s teplotou nedochází ke změně k-faktoru větší než 1% , což je hodnota srovnatelná s chybou měření a s rozptylem k-faktoru uváděného výrobcem pro teplotu 24 °C .

Přípravek bude dále využíván pro zkoušky tenzometrů v kryostatu při působení magnetického pole až 6 T .

Literatura:

- [1] Jelínek, Málek: Kryogenní technika. SNTL Praha 1982
- [2] Sedláčková, Kúrka: Magnet 7 T v kryostatu HK 200
Výzkumná zpráva VÚET - ETD
- [3] Dolhof: Metodika a možnosti měření napjatosti při
extrémních provozních podmínkách
Výzkumná zpráva ÚVZÚ

Ing. Petr Bohdan - Ústřední výzkumný ústav, k. p. Škoda
Plzeň, 316 00 Plzeň