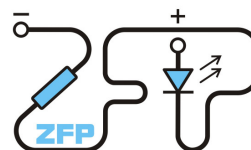


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

## Fyzikální praktikum ...



Úloha č. ....

Název úlohy: .....

Jméno: ..... Obor: FOF FAF FMUZV

Datum měření: .....

Datum odevzdání: .....

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 - 5	
Teoretická část	0 - 1	
Výsledky měření	0 - 8	
Diskuse výsledků	0 - 4	
Závěr	0 - 1	
Seznam použité literatury	0 - 1	
<b>Celkem</b>	max. 20	

Posuzoval:.....

dne: .....

# 1 Pracovné úlohy

1. Zmerať tuhosť aparatúry  $K$ .
2. Vykonať dynamickú skúšku deformácie v tlaku priloženej vzorky.
3. Výsledok dynamickej skúšky v tlaku graficky znázorniť a určiť medzné napätie  $\sigma_{0,2}$  a  $\sigma_U$ .

## 2 Teoretická časť

### 2.1 Priebeh deformácie v tlaku pri kovoch

Vzťah medzi napätím a deformáciou je pri kovoch značne komplikovaný, závisí od materiálu a jeho štruktúry, pôsobiacej sily a prierezu vzorky [1]. Na približný popis mechanického napätia sa zavádza jednak *skutočné napätie*,

$$\sigma' = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

kde  $F$  je pôsobiaca sila a  $S$  skutočný prierez vzorky počas pôsobenia napätia a jednak *zmluvné napätie*,

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \quad (2)$$

pričom  $S_0$  je prierez nedeformovaného vzorku.

Na popis deformácie sa takisto používaajú dve veličiny. Jednou je *relatívna deformácia*  $\varepsilon_0$  (viď rovnicu (3)) a druhou *skutočná deformácia*  $\varepsilon$  (rovnicu (4)). V oboch  $l_0$  značí pôvodnú dĺžku vzorky a  $l$  dĺžku vzorky po deformácii.

$$\varepsilon_0 = \frac{|l - l_0|}{l} = \frac{\Delta l}{l} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} \quad (4)$$

Pri predpoklade konštantného objemu počas deformácie platí vzťah:

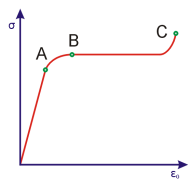
$$\sigma' = \sigma(1 + \varepsilon_0) \quad (5)$$

Priebeh závislosti napätia a deformácie má vo všeobecnosti tvar ako na Obr. 1 [2]. Do bodu  $A$  má závislosť lineárny charakter, teda sa materiál správa ako Hookovsky pružná látka. Bod  $A$  sa nazýva *medzou úmernosti* (napätie v tomto bode značíme  $\sigma_U$ ). Po prekročení tohto bodu sa už látka nedeformuje lineárne s napätím. Ďalšími význačnými bodmi v grafe sú *medza pružnosti* (na Obr. 1 bod  $B$ ) vyznačujúca prechod medzi elastickou a plastickou deformáciou a *medza pevnosti* (na Obr. 1 bod  $C$ ), za ktorou dochádza k roztrhnutiu materiálu.

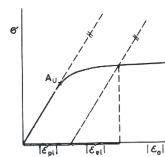
Pri hľadaní medze pružnosti sa využíva fakt, že po jej prekročení sa celková relatívna deformácia skladá z pružnej (Hookovskej) a plastickej časti, teda platí:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{el} \quad (6)$$

Za normovú mieru plastickej deformácie sa berie  $\varepsilon_{pl} = 0,2\%$  a jej zodpovedajúce napätie sa označuje ako  $\sigma_{0,2}$ . Jeho veľkosť sa určuje grafickou metódou pomocou vzorca (6) spôsobom naznačeným na Obr. 2 [1].



Obr. 1: Priebeh deformácie



Obr. 2: Určenie napätia  $\sigma_{0,2}$

## 2.2 Použitá experimentálna metóda

Dynamická skúška deformácie v tlaku bola vykonaná na zariadení, ktoré pomocou rotujúceho kotúča stláčalo vzorku konštantnou rýchlosťou a pomocou odporového tenzometra napojeného na multimeter NI USB - 4065 cez počítačový program Zapisovač zaznamenával časový priebeh elektrického napätia aparátúry. Spracovanie kriviek sa potom riadilo nasledovnými vzťahmi:

$$F = \alpha U, \quad (7)$$

$$\Delta l = f D t, \quad (8)$$

pričom  $\alpha = (50, 0 \pm 0, 5) \text{ N/mV}$ ,  $f = (0, 60 \pm 0, 01) \text{ mHz}$  je frekvencia otáčania kotúča a  $D = 0, 75 \text{ mm}$  je zdvih zodpovedajúci jednej otáčke. Použitou vzorkou bola pájka (zliatina Pb a Sn).

V priebehu dynamickej skúšky nie je možné považovať aparátúru za dokonale tuhú. Vplyv zariadenia na deformáciu sme určili z tzv. *kalibračnej krivky*, pri ktorej bola namiesto meranej vzorky použitá vzorka, ktorú možno v dobrom priblížení považovať za dokonale tuhú. Kalibračná krivka v lineárnej časti spĺňa vzťah (9), kde  $K$  značí tuhosť aparátúry. Namerané hodnoty samotnej deformačnej skúšky boli potom upravené na základe vzorcov v (10) ( $\Delta l$  je celkové skrátenie,  $\Delta l_A$  skrátenie aparátúry,  $\Delta l_v$  skrátenie vzorky).

$$F = K \cdot \Delta l_A \quad (9)$$

$$\Delta l = \Delta l_A + \Delta l_v \implies \Delta l_v(F) = \Delta l(F) - \frac{F}{K} \quad (10)$$

## 2.3 Štatistické spracovanie dát

Všetky výsledky priamych meraní sú udávané so strednou kvadratickou chybou ( $P = 68,27\%$ ). Prenos neistoty a relatívna chyba nepriameho merania boli pri štatistických spracovaniach počítané pomocou vzorcov [3]:

$$\eta_{S_0} = \sqrt{(2\eta_d)^2} = 2\eta_d \quad (11)$$

$$y = c \cdot x \implies \eta_y = \sqrt{(\eta_c)^2} = \eta_c \quad (12)$$

$$\eta_x = \frac{u_x}{\bar{x}} \quad (13)$$

### 3 Výsledky merania

Pred skúškami sme odmerali dĺžku  $l_0$  a priemer  $d$  nedeformovanej vzorky. Hodnoty sú uvedené v Tab. 1 a 2.

Číslo merania	$\frac{l_0}{[\text{mm}]}$
1	10,40
2	10,35
3	10,45
3	10,40
3	10,40

Tab. 1: Merania dĺžky vzorky

Číslo merania	$\frac{d}{[\text{mm}]}$
1	7,41
2	7,39
3	7,32
3	7,32
3	7,31

Tab. 2: Merania priemeru vzorky

Vzhľadom na odchýlku použitých meradiel (postupne posuvné meradlo a mikrometrická skrutka) sú namerané hodnoty nasledovné:

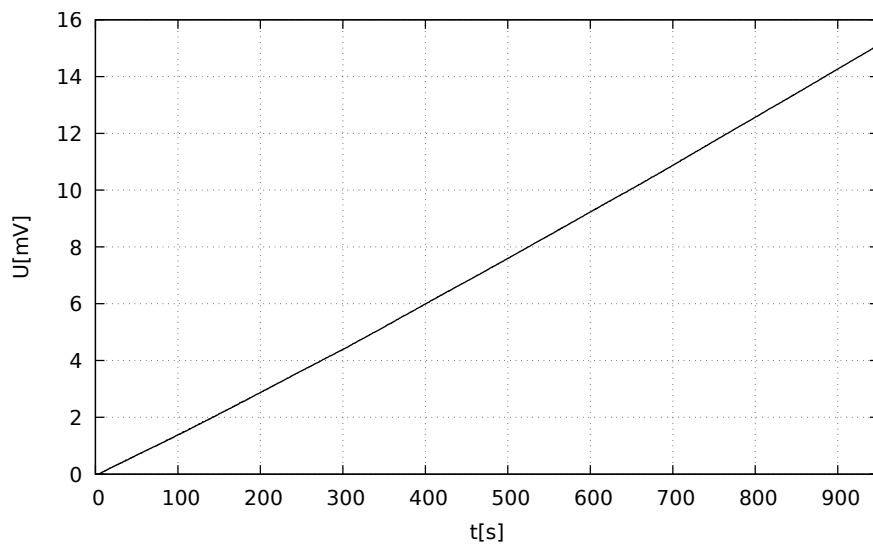
- $l_0 = (10,40 \pm 0,03) \text{ mm}$
- $d = (7,35 \pm 0,02) \text{ mm}$

Z priemeru  $d$  sme pomocou vzorca (11) (a vzorca pre výpočet plošného obsahu kruhu) určili prierez nedeformovanej vzorky  $S_0 = (42,4 \pm 0,2) \text{ mm}^2$ .

#### 3.1 Kalibračná skúška

Pre potreby kalibrácie bola do aparatúry vložená vzorka z ocele, ktorej priemer bol v porovnaní s jej dĺžkou dostatočne veľký na to, aby ju bolo možné považovať za dokonale tuhú. Zariadenie bolo spustené a program Zapisovač zaznamenával hodnoty elektrického napätia v závislosti na čase až po dosiahnutie hodnoty 15 mV, kedy bolo zapisovanie zastavené. Graf z tejto skúšky je na Obr. 3 (zrekonštruovaný z uložených dát pomocou programu GNUplot) a taktiež v prílohe z merania.

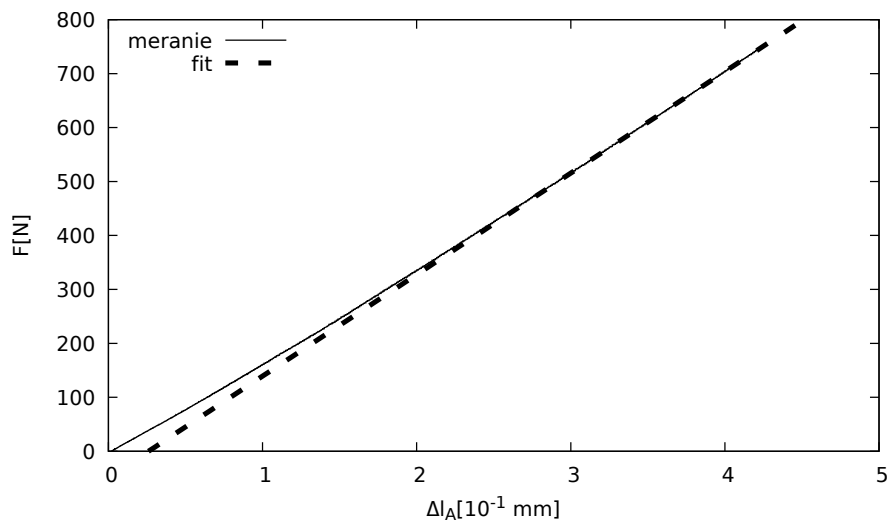
Spracovanie krivky spočívalo v prevedení závislosti  $U = U(t)$  za pomoci rovníc (7) a (8) na závislosť  $F = F(\Delta l_A)$ , výbere lineárnej časti grafu, lineárnej regresii a konečne určení tuhosti  $K$  použitej aparatúry. Závislosti boli prevedené v programe Excel. Za lineárnu časť sme zvolili oblasť od  $t \approx 650 \text{ s}$  do konca merania, resp. jej zodpovedajúce hodnoty na prevedenom grafe. Tieto sme v programe GNUplot fitovali závislosťou  $y = a \cdot x + b$  s nasledujúcimi výsledkami (jednotky pre fit boli na vodorovnej osi m, na zvislej N):



Obr. 3: Kalibračná krivka ( $U = U(t)$ )

- $a = (1\,881\,660 \pm 5) \text{ N/m}$
- $b = (-48,8 \pm 0,2) \text{ N}$

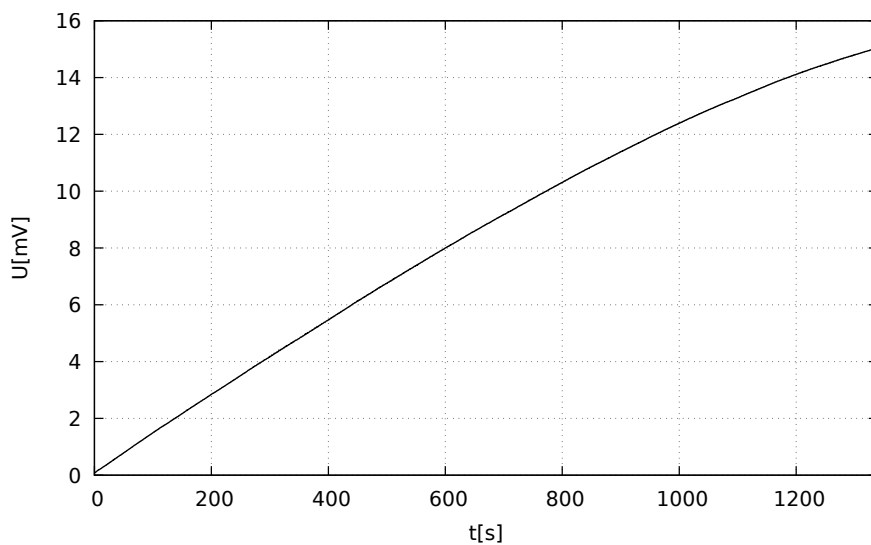
Konštanta  $b$  nie je z fyzikálneho hľadiska smerodajná, no  $a$  označuje podľa (9) hľadanú tuhosť aparatúry. Máme teda  $K = (1\,881\,660 \pm 5) \text{ N/m}$ . Výsledný graf spracovania kalibračnej skúšky je na Obr. 4.



Obr. 4: Spracovaná kalibračná krivka ( $F = F(\Delta l_A)$ )

### 3.2 Dynamická skúška deformácie vzorky

Samotná deformačná skúška bola vykonaná analogicky ku kalibračnej s použitím vzorku pájky. Prvotným výstupom bol podobne ako v sekcii 3.1 graf  $U = U(t)$ , ktorý možno vidieť na Obr. 5, resp. v prílohe z merania. Okrem prevodu cez rovnice (7) a (8) bolo nutné použiť aj rovnicu (10) z dôvodov popísaných v teoretickej časti. Ďalej sme výslednú silu predelili počiatočným prierezom  $S_0$  a skrátenia vzorku sme delili pôvodnou dĺžkou  $l_0$ , čím sme podľa vzorcov (2) a (3) dostali závislosť  $\sigma = \sigma(\varepsilon_0)$ . Tá bola nakoniec v oboch osiach posunutá do počiatku.



Obr. 5: Graf priebehu deformačnej skúšky ( $U = U(t)$ )

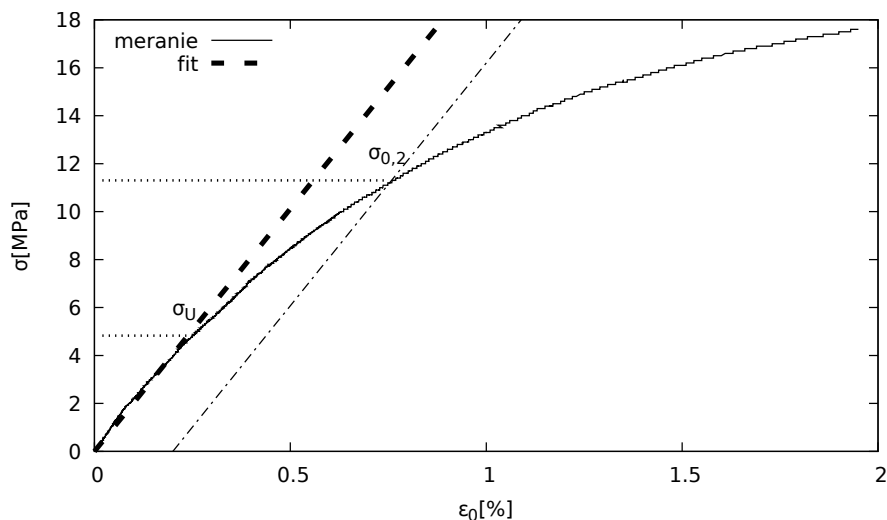
Za lineárnu časť grafu sme zvolili oblasť od začiatku merania po  $t \approx 300$  s a jej zodpovedajúce hodnoty na spracovanom grafe. Oblasť sme fitovali v programe GNUplot závislosťou  $y = c \cdot x$  s výsledkom  $c = (2,025 \pm 0,003) \times 10^9$  Pa. Podľa návodu v [1] sme posunuli priamku fitu a grafickou metódou určili jednak medzi úmernosti a jednak  $\sigma_{0,2}$ . Výsledný graf spracovaný v programe GNUplot je na Obr. 6.

Z grafu sme určili nasledovné hodnoty hľadaných parametrov (chyby boli odhadnuté zo vzorca (12)):

- $\sigma_U = (4,83 \pm 0,01)$  MPa
- $\sigma_{0,2} = (11,18 \pm 0,02)$  MPa

## 4 Diskusia výsledkov

Štatistické chyby fitov a priamych meraní, ako aj systematické chyby spôsobené nepresnosťou meracích prístrojov boli veľmi malé, ale je nutné uvažovať hrubú chybu, ktorá vznikla subjektívnym výberom lineárnych častí grafu. Táto má v nameraných hodnotách oveľa väčšiu váhu ako predošlé spomenuté, nie je však



Obr. 6: Spracovaný graf priebehu deformačnej skúšky ( $\sigma = \sigma(\varepsilon_0)$ )

možné ju exaktne vyčíslit'. K hrubej chybe došlo takisto pri predpoklade lineárnej odozvy aparatury na celom spektre deformačnej skúšky. Odstránenie tejto chyby by bolo možné fitovaním kalibračnej krivky inou závislosťou, ktorá by vystihovala priebeh grafu pomerne presne na celom rozmedzí hodnôt, prípadne priame spárovanie meraných skrátení v skriptovacom jazyku (napr. Python). Porovnanie výsledkov s tabuľkovými hodnotami neposkytuje dobrú informáciu o povahe merania, nakoľko tieto závisia od tvaru vzorky a použitej metódy, parametrov potenciálne odlišných od nášho merania.

## 5 Záver

Cieľom práce v praxi bolo vykonať dynamickú tlakovú skúšku deformácie vzorky zliatiny Pb a Sn, údaje spracovať a graficky znázorniť. Merania bolo nutné korigovať vlastnou deformáciou meracieho zariadenia, čo sme dosiahli metódou lineárnej regresie na kalibračnej krivke. Pri predpoklade lineárnej závislosti deformácie na pôsobiacej sile sme určili hodnotu tuhosti aparatury  $K = (1\,881\,660 \pm 5) \text{ N/m}$ . Z výsledného grafu sme odčítali hodnoty napätia jednak pre medzu úmernosti ( $\sigma_U = (4,83 \pm 0,01) \text{ MPa}$ ) a tiež pre medzu "0,2" ( $\sigma_{0,2} = (11,18 \pm 0,02) \text{ MPa}$ ).

## Zoznam použitej literatúry

- [1] [http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/texty/txt\\_111.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_111.pdf). aktuálne k 16.3. 2018.
- [2] A. HAVRÁNEK. *Klasická mechanika I - II*. Praha: Karolinum, Praha 2002-3. skriptum.
- [3] J. BROŽ a kol. *Základy fyzikálních měření I*. Praha: SPN, 1967.