

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum I

Úloha č. XIV

Dynamická zkouška deformace látek v tlaku

Měřil a zpracoval: Antonín Baďura, FOF

Měřil dne: 10. dubna 2018

Odevzdal dne: 17. dubna 2018

Poznámky 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	
Úhrnem	nejvýše 20	

Hodnotil dne

1 Zadání úlohy

1. Změřte tuhost aparatury K .
2. Proveďte dynamickou zkoušku deformace v tlaku přiloženého vzorku.
3. Výsledek dynamické zkoušky v tlaku graficky znázorněte a určete mezní napětí $\sigma_{0,2}$ a σ_U .

2 Teoretická část

Působíme-li na vzorek, jenž není dokonale tuhý, stlačující silou F , dochází v něm ku vzniku napětí, jehož důsledkem je deformace vzorku. Během stlačování nejsou rozměry vzorku konstantní, a můžeme tak rozlišit *smluvní napětí* σ vztahené k původnímu průřezu S_0 a *skutečné napětí* σ' pro dynamicky se měnící průměr S :

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \quad \sigma' = \frac{F}{S}. \quad (1)$$

Jako míru deformace vzorku o původní délce l_0 volíme relativní deformaci ε_0 zavedenou vztahem:

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2)$$

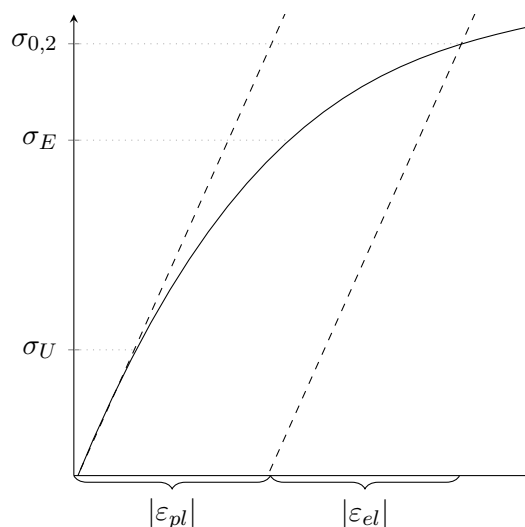
kde Δl je změna délky vzorku způsobená deformací.

V grafu 1 je znázorněna závislost smluvního napětí ve vzorku na jeho relativní deformaci. Napětí σ_U se nazývá mezní úměrnosti — přesáhne-li napětí ve vzorku tuto hodnotu, přestává být rel. prodloužení na napětí lineárně závislé. Je-li dále překročena i hodnota σ_E , tedy mez pružnosti, přestává být deformace elastická a začíná být plastickou (tj. vzorek se po odstranění zdroje napětí nevrací do původní polohy).

Deformaci je možno rozložit na plasticou složku ε_{pl} a elastickou složku ε_{el} , přičemž pružná složka i po překonání meze úměrnosti se je v lineární závislosti na smluvním napětí:

$$|\varepsilon_0| = |\varepsilon_{pl}| + |\varepsilon_{el}|, \quad (3)$$

způsob určení plastické složky je znázorněn v grafu 1. Přechod mezi elastickou a plasticou deformací není u většiny materiálů dobře zřejmý, proto se pro určení σ_E užívá normovaná míra plastické deformace $\sigma_{0,2}$ odpovídající $\varepsilon_{pl} = 0,2\%$.



Graf 1: Obecná deformační křivka

Použitá aparatura se skládá ze zdvižné podložky, která stlačuje vzorek proti tenzometrickému snímači. Ten převádí měřený tlak na elektrické napětí U , které je s působící silou F spjato jako:

$$F = \alpha U, \quad (4)$$

kde $\alpha = (50 \pm 0,5) \text{ N(mV)}^{-1}$. Zdvih je zajištěn šroubem otáčejícím se s frekvencí $f = (0,6 \pm 0,01) \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, přičemž jedna otočka odpovídá zdvihu $D = 0,75 \text{ mm}$. Změna délky Δl je tak časově závislá jako:

$$\Delta l = fD\Delta t. \quad (5)$$

Nejen vzorek, ale i samotná aparatura je elastická. Proto je třeba při výpočtu změny délky vzorku Δl_v zahrnout i deformaci aparatury jako Δl_A :

$$|\Delta l_v| = |\Delta l| - |\Delta l_A|. \quad (6)$$

Předpokládáme, že se aparatura deformuje pouze elasticky, a to lineárně jako:

$$F = K|\Delta l_A|, \quad (7)$$

kde konstanta K představuje *tuhost aparatury*. Kombinací rovnic 1 a 4 je možno z měřených hodnot vyjádřit smluvní napětí jako:

$$\sigma = \frac{\alpha(U - U_0)}{S_0} \quad (8)$$

a pomocí rovnic 2, 5, 6 a 7 $|\varepsilon_0|$:

$$|\varepsilon_0| = \frac{fD\Delta t}{l_0} - \frac{\alpha(U - U_0)}{Kl_0}. \quad (9)$$

3 Výsledky měření

Fyzikální podmínky v laboratoři. Měření probíhalo při teplotě $(25,1 \pm 0,4)^\circ\text{C}$, atmosférickém tlaku $(977 \pm 2) \text{ hPa}$ a relativní vlhkosti vzduchu $(35,1 \pm 2,5) \%$.

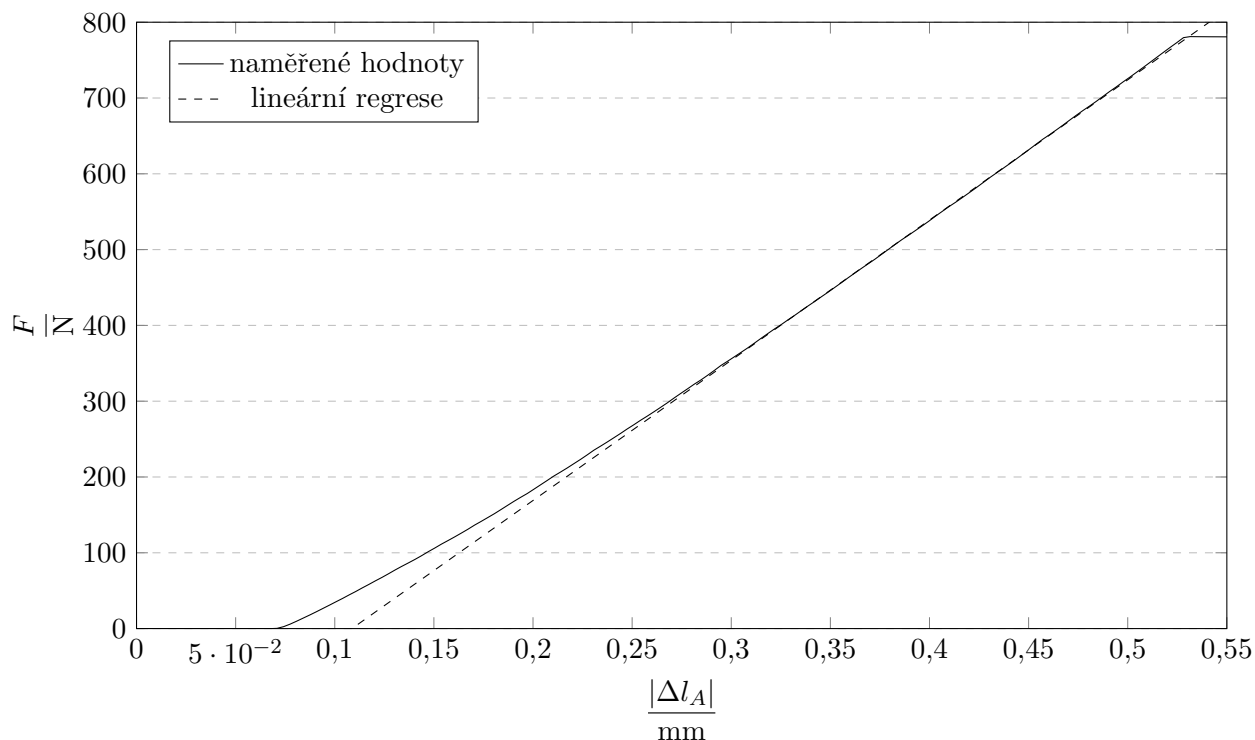
Nejprve byla určena tuhost aparatury K . Časová závislost elektrického napětí, která byla výstupem snímače, byla podle vztahů 4 a 5 převedena na závislost působící síly F na deformaci aparatury $|\Delta l_A|$. Tato závislost je vyobrazena v grafu 2. Tuhost aparatury K byla určena jako směrnice lineární regresní křivky, která byla proložena změřenou a přepočtenou závislostí. Lineární regrese nebyla provedena na celém úseku naměřených dat, ale až hodnot $|\Delta l_A|$, při nichž došlo k dosednutí kalibračního vzorku a aparatury, tedy od okamžiku, kdy je závislost přibližně lineární (tedy přibližně v rozsahu $0,29 - 0,51 \text{ mm}$). Takto určená tuhost aparatury pak vychází jako:

$$K = (1850 \pm 40) \text{ N (mm)}^{-1},$$

kde byla nejistota spočtena pomocí běžného vztahu pro přenos nejistoty (statistická nejistota byla oproti přenesené nejistotě instrumentální zanedbatelná) [3]:

$$\sigma_K = K \sqrt{\left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2}, \quad (10)$$

kde σ_U je nejistota měření elektrického napětí, která je v případě použitého multimetru NI-4065 35 ppm z použitého rozsahu 100 mV a 90 ppm z naměřené hodnoty (uvažujeme maximální hodnotu, tj. 15 mV), potom $\sigma_U = 0,005 \text{ mV}$.



Graf 2: Závislost deformační síly F na deformaci aparatury $|\Delta l_A|$. Zobrazena je rovněž křivka lineární regrese, její směrnice je rovna tuhosti aparatury K a absolutní člen je roven -231 N

V grafu 3 je vykreslen výsledek deformační zkoušky. Vzorkem byl váleček ze slitiny olova a cínu ($(50,2 \pm 2,2) \%$ Pb, $(48 \pm 2,3) \%$ Sn) se stopovým množstvím mědi, manganu a železa. Původní délka vzorků l_0 i jejich průměr d byl určen deseti měřeními mikrometrickým šroubem s nejmenším dílkem $0,01$ mm (uvažovaná instrumentální nejistota je tedy $0,01$ mm), a to jako $l_0 = (10,01 \pm 0,01)$ mm a $d_0 = (7,30 \pm 0,01)$ mm — statistická nejistota byla v porovnání s instrumentální zanedbatelná. Měřené hodnoty časové závislosti elektrického napětí byly podle rovnic 8 a 9 přepočteny na závislost smluvního napětí na relativním prodloužení $|\varepsilon_0|$. Původní průřez byl určen ze zřejmého vzorce $S_0 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$. Normovaná míra plastické deformace $\sigma_{0,2}$ i mez úměrnosti σ_U byly určeny graficky z přepočtených hodnot v programu Origin:

$$\sigma_{0,2} = (14,9 \pm 0,3) \text{ MPa}$$

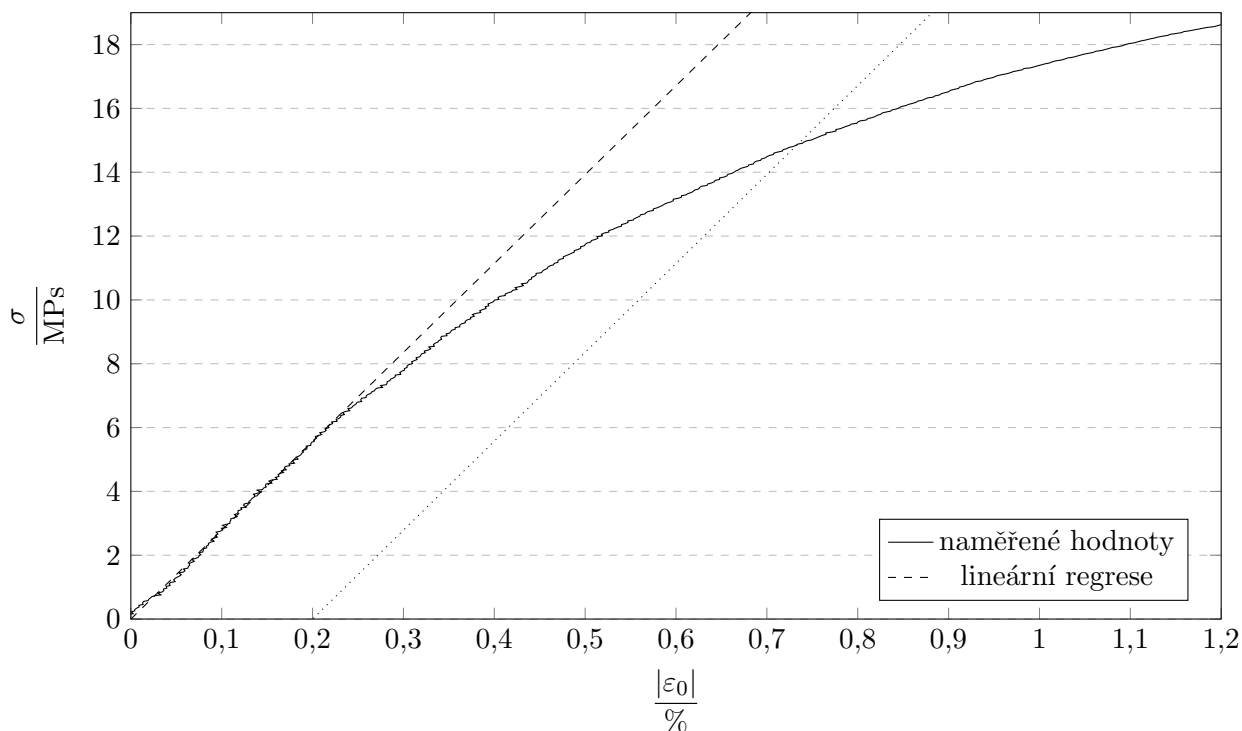
$$\sigma_U = (6,3 \pm 0,2) \text{ MPa}$$

Nejistoty byly určeny standardním vztahem pro přenos nejistoty (ze vzorce 8), přičemž byla započten i odhad nejistoty grafického odečtu hodnoty napětí $\sigma_O = 0,2$ MPa:

$$\sigma_{\sigma_{0,2}} = \sigma_{0,2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_O}{\sigma_{0,2}}\right)^2}. \quad (11)$$

4 Diskuse výsledků

V grafu 3 je dobře vidět aparatura byla na měřeném rozsahu elastickou (pomineme-li dosedání zpočátku). A z rozsahu hodnot deformace je zřejmo, že bylo nezbytné započítat tuhost aparatury při určování deformace vzorku (kterak bylo učiněno).



Graf 3: Závislost smluvního napětí σ na relativním prodloužení $|\varepsilon_0|$. Zobrazena je rovněž rovněž křivka lineární regrese (směrnice je rovna $27,9 \cdot 100$ MPa), která reprezentuje elastickou deformaci vzorku (byla určena z hodnot $|\varepsilon_0|$ přibližně 0,07–0,2 %)

Ve výše uvedených výpočtech není uvažována nejistota měření času při záznamu času: napětí bylo zapisovačem snímáno s frekvencí přibližně 5 Hz — při nejistotě odpovídající jednomu dílci 0,2 s by se takto způsobená nejistota ve výsledné nejistotě vůbec neprojevila. Závažnějším nedostatkem byl nízký počet provedených měření — jedno. Kromě měření samotného vzorku se to jako nedostatečné ukazuje u měření tuhosti aparatury, jejíž absolutní deformace byla větší, nežli absolutní deformace vzorku — přesnost kalibrace aparatury se tak valně projevila i na přesnosti dynamické zkoušky. Problematické bylo i určování regresní křivky v grafu 3 i 2, kde byly intervaly pro regresní analýzu určován graficky, neboť bylo třeba odhadnout konec lineární oblasti, resp. okamžik dosednutí aparatury a vzorku.

Tabelované hodnoty meze úměrnosti, ani meze $\sigma_{0,2}$ pro materiál vzorku nebyly nalezeny. Ovšem [4] uvádí pro slitiny olova hodnotu meze pružnosti v tahu (v případě malých deformací jsou hodnoty meze pružnosti v tahu a tlaku přibližně stejné) 8–14 MPa, kterýžto rozptyl je ve shodě s dolní i horní hranicí, tedy $\sigma_U = 6,3$ MPa a $\sigma_{0,2} = 14,9$ MPa.

5 Závěr

Byla provedena dynamická zkouška v tlaku vzorku především z cínu a olova a byla určena mezní napětí σ_U a $\sigma_{0,2}$:

$$\begin{aligned} \sigma_{0,2} &= (14,9 \pm 0,3) \text{ MPa (rel. nejistota 2 \%)}, \\ \sigma_U &= (6,3 \pm 0,2) \text{ MPa (rel. nejistota 3 \%)}, \end{aligned}$$

Rovněž byla určena tuhost použité aparatury K :

$$K = (1850 \pm 40) \text{ N (mm)}^{-1} \text{ (rel. nejistota 2\%)}$$

Uvedené hodnoty odpovídají hladině pravděpodobnosti $\approx 68,3\%$.

Literatura

- [1] *Studijní text k základnímu fyzikálnímu praktiku I, úloha XI* [online]. KVOF MFF UK [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_111.pdf
- [2] *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. Praha: Prometheus, 2003, s. 216–217. ISBN 978-80-7196-264-9.
- [3] ENGLISH, J. *Úvod do praktické fyziky*. Praha: Matfyzpress, 2006, ISBN 80-86732-93-2.
- [4] *Materials Data Book* [online]. Cambridge University Engineering Department, 2003 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/cueddatabooks/materials.pdf>