

1 Pracovní úkol

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 Teoretický úvod

2.1 Deformace vzorku

Při působení tlakové či tahové síly na vzorek dochází k jeho deformaci. Pro popis deformace je definováno skutečné napětí

$$\sigma' = \frac{F}{S},$$

kde F je působící síla kolmá na skutečný průřez S . Dále je definováno smluvní napětí

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

kde S_0 je průřez nedeformovaného vzorku.

Dále je standardně zavedená relativní¹ deformace

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

kde l resp. l_0 je rozměr deformovaného resp. nedeformovaného vzorku.

Průběh deformace v závislosti na velikosti působící síly (působícího napětí) probíhá pro různé materiály obecně velmi různě. Pro poměrně velké množství kovových materiálů je relativní deformace ε_0 přímo úměrná velikosti působícího napětí. Tedy až po nějaké mezní napětí lze deformaci popsat Hookovým zákonem. Napětí při kterém přestane platit přímá úměra se nazývá *mez úměrnosti* σ_U . Při překročení tohoto napětí deformace probíhá stále elasticky. Při překročení *meze pružnosti* σ_E se deformace stává plastickou a i po uvolnění působícího napětí zůstane těleso trvale zdeformováno. Velikost konečné hodnoty trvalé deformace vzorku závisí na velikosti a na době po kterou napětí působí.

Pro popis trvalé deformace se zavádí napětí $\sigma_{0,2}$, zváno též *mez 0,2*. Je definováno jako napětí jemuž odpovídá plastická deformace o hodnotě $\varepsilon_{pl} = 0,2\%$. Mez 0,2 lze dle [1] určit přímo ze zatěžovacího diagramu rozložením deformace na plastickou a elastickou část a nalezením na křivce v zatěžovacím diagramu bod odpovídající $\varepsilon_{pl} = 0,2\%$. Tímto bodem ($\varepsilon_{pl} = 0,2\%, \sigma = 0$) a směrnici danou Hookovým zákonem je určena lineární funkce. Hodnotu $\sigma_{0,2}$ lze pak odečíst z průsečíku výše zmiňované lineární funkce a křivky určené naměřenými hodnotami.

¹je možné definovat také skutečnou deformaci určenou vztahem $\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}$

3 Dynamická zkouška deformace v tlaku

K měření deformace v tlaku slouží měřicí aparatura, která stlačuje vzorek konstantní rychlostí a zaznamenává velikost působící síly a čas. Pokud jedna otáčka kotouče aparatury odpovídá stlačení vzorku o 0,75 mm a počet otáček normován časem má hodnoty $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, pak je změna délky měřeného vzorku dána vztahem

$$\Delta l = 0,75 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot t, \quad (3)$$

kde t je čas, kterému vždy přísluší údal o velikosti deformace.

Během měření dochází k vlastní deformaci aparatury, tu je nutné odečíst od deformace vzorku. Tedy pro výslednou deformaci platí vztah

$$\Delta l_V = 0,75 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot t - \frac{F}{K}, \quad (4)$$

kde K je vlastní tuhost aparatury a F je síla na vzorek působící. Pro tu platí

$$F = \alpha \cdot U, \quad (5)$$

kde U je výstupní napětí a $\alpha = 50 \text{ N/mV}$ je převodní konstanta charakterizující aparaturu mezi elektrickými a mechanickými veličinami.

4 Měření

4.1 Tuhost aparatury

Do aparatury jsem vložila kalibrační váleček z tuhé oceli, jehož rozměry jsou značně větší než rozměry testovacích vzorků. Tedy při postupném stlačováním kalibračního válečku zaznamenávám průběh deformace samotné aparatury v závislosti na působící síle. Výstup z měřicí aparatury zajišťuje program Zapisovač jenž vypíše vždy čas měření a výstupní hodnotu elektrického napětí. Přepočítání mezi těmito veličinami určují vztahy (3) a (5). Výslednou závislost zobrazuje obrázek 1. Tuhost určená lineární regresí v lineární části grafu (nezapočítaná data z počátku měření, viz obrázek 1) programem Gnuplot je

$$K = (1707 \pm 0,6) \text{ kN/m},$$

kde uvedená chyba je chyba lineární regrese určena programem.

Poté jsem vložila do aparatury vzorek, tj. váleček o počátečních rozměrech změřených mikrometrem

$$\begin{aligned} v &= (10,20 \pm 0,01) \text{ mm}, \\ d &= (7,48 \pm 0,01) \text{ mm}, \end{aligned}$$

za chybu měřidla jsem brala nejmenší dílek stupnice (v případě mikrometru 0,01 mm).

V případě měřeného vzorku jsem ke zpracování výstupních hodnot programu Zapisovač použila vztahy (4),(5) a přepočtu na relativní prodloužení a napětí vztahy (1) a (2). Výslednou závislost ukazuje obrázek 2. Proložení lineární části grafu Hookovým zákonem dostanu modul pružnosti válečku v tlaku $E = (1986 \pm 9) \text{ MPa}$, což je zároveň směrnice přímky sloužící k určení $\sigma_{0,2}$. Dále je v grafu zaznamenána hodnota meze úměrnosti σ_U a také hodnota $\sigma_{0,2}$. Tedy tyto veličiny nabývají hodnot

$$\begin{aligned}\sigma_U &= (5.7 \pm 0.5) \text{ MPa}, \\ \sigma_{0,2} &= (9.8 \pm 0.1) \text{ MPa},\end{aligned}$$

kde chyba u σ_U je určena z [2] jakožto velikost chyby elektrických měřících přístrojů, z rozsahu měřícího přístroje a měřeného intervalu. Tato chyba vychází velmi malá, proto nadhodnocuji její velikost, vzhledem k tomu, že je nutné tuto hodnotu ručně odečíst z grafu. Nejistota $\sigma_{0,2}$ je zatížena jak chybou určení průměru d vzorku, ale také chybou fitu veličiny E . Tyto chyby jsem dle pravidel kvadratického hromadění chyb sečetla.

Rozměry po deformaci

$$\begin{aligned}v_d &= (9,79 \pm 0,01) \text{ mm}, \\ d_d &= (7,60 \pm 0,01) \text{ mm},\end{aligned}$$

5 Diskuze

Z výsledků získaných lineární regresí při určování tuhosti aparatury, tedy jejich velkou přesností, lze usuzovat, že se aparatura chová elasticky a nedochází k její trvalé deformaci. Téměř v celém průběhu je deformace přímo úměrná působící síle. Odchylka od lineární závislosti na začátku může být způsobena nerovnostmi kalibračního vzorku. Odchylka ke konci měření může indikovat nelineární deformaci aparatury popřípadě kalibračního vzorku. Pro lineární regresi byla použita pouze ta data, která nejeví odchylku od lineární závislosti.

Při vlastním měření vzorku je na obrázku 2 vidět, že nejprve je relativní deformace přímo úměrná působící síle, ale s jinou směrnicí než následný úsek. To může být způsobeno povrchovými nerovnostmi vzorku, které se po jisté době působení síly odstraní. Popřípadě počáteční různoběžností podstav válečku. Dále je závislost lineární a splňuje Hookův zákon. Po překročení σ_U (viz obrázek 2 je pozorovatelná nelineární elastická deformace a následně trvalá deformace plastická.

Určení meze pružnosti σ_U je zatíženo velkou chybou, jedná se spíše o odhad. Pro přesnější určení této hodnoty by bylo třeba měření provést pro větší množství válečků a lépe vyhodnotit zátěžový diagram daného materiálu. Určení hodnoty $\sigma_{0,2}$ je naopak mnohem přesnější. Modul pružnosti v tahu je určen poměrně přesně a totéž platí o průměru válečku.

Z konečných rozměrů vzorku se potvrdilo, že došlo k trvalé plastické deformaci. Na zdeformovaném vzorku je okem pozorovatelná nerovnoměrnost, tedy vzorek se nedeformoval v celém objemu rovnoměrně, což vnáší do měření další nepřesnost.

6 Závěr

Změřila jsem tuhost aparatury

$$K = (1707 \pm 0,6) \text{ kN/m},$$

naměřená data s proloženou lineární závislost jsou na obrázku 1.

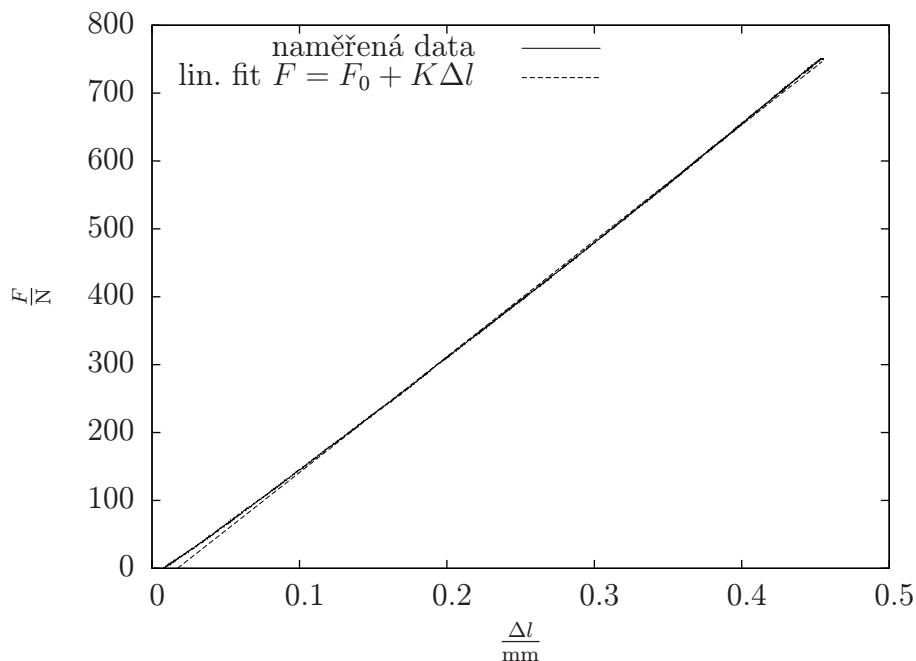
Dále jsem provedla dynamickou zkoušku deformace testovacího vzorku, kde výsledné jsou zobrazeny na obrázku 2 a 3. Z těchto grafů jsem odečetla mez úměrnosti σ_U a mez 0,2,

$$\sigma_U = (5.7 \pm 0.4) \text{ MPa},$$

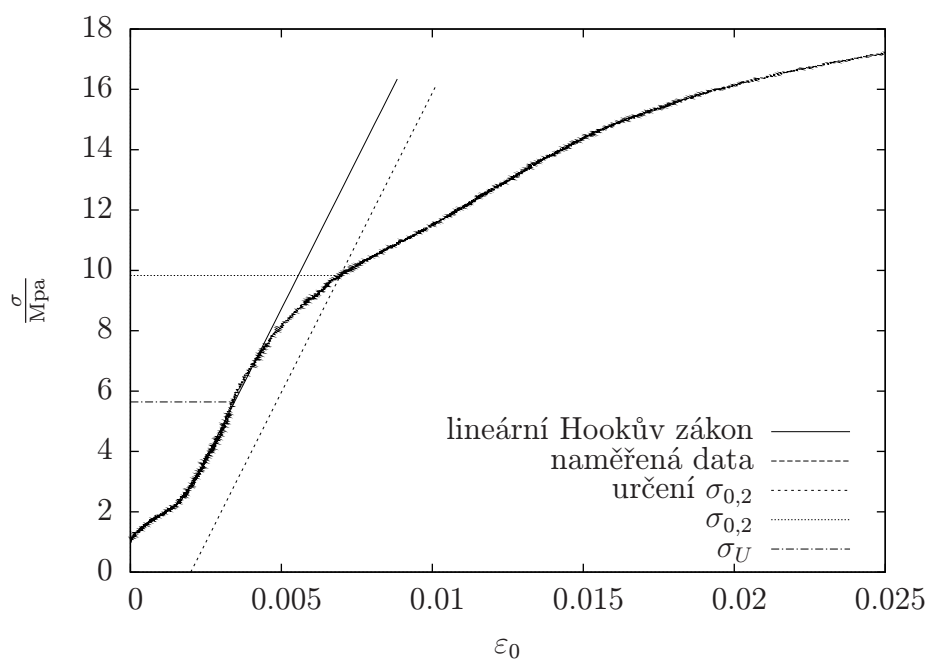
$$\sigma_{0,2} = (9.8 \pm 0.1) \text{ MPa}.$$

Reference

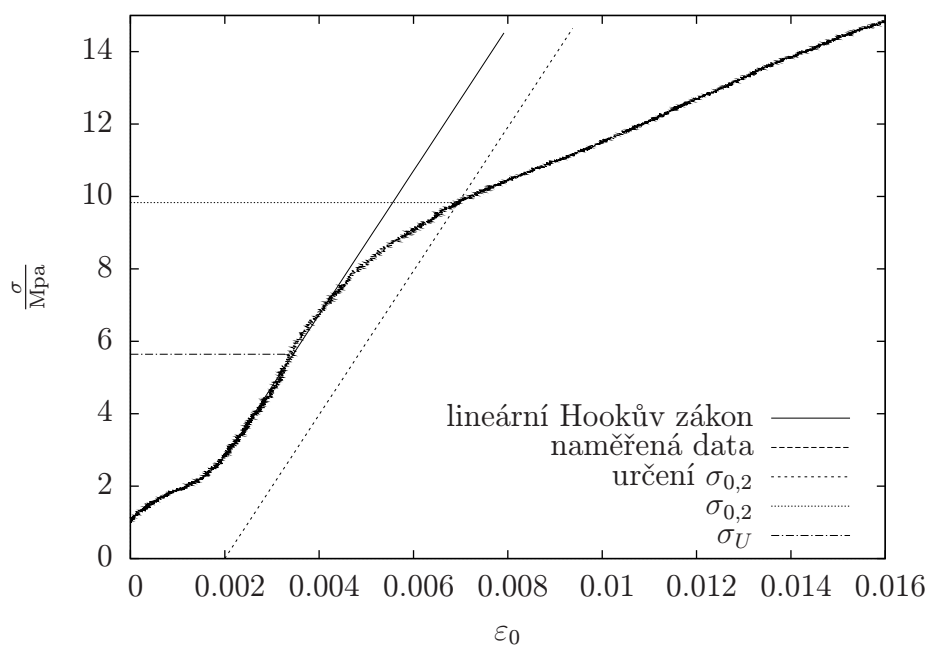
- [1] Studijní text - <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/111.htm>, Dynamická zkouška deformace látek v tlaku, 11.3 2011
- [2] Čížek, J. - Úvod do praktické fyziky, <http://physics.mff.cuni.cz/kfnt/>, 27.2 2011



Obrázek 1: Kalibrace měřící aparatury



Obrázek 2: Deformace vzorku v měřící aparatuře



Obrázek 3: Detail deformace vzorku v měřící aparatuře