

**EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA ELASTICKO-PLASTICKÉHO CHOVÁNÍ MATERIÁLU S NEVÝRAZNOU MEZÍ KLUZU**

Ing. Jan Rezníček - katedra nauky o pružnosti a pevnosti  
strojní fakulta ČVUT Praha

*Anotace: Předložená práce popisuje měření a vyhodnocení výsledků tahových zkoušek materiálu X 60. Zatěžovací resp. jeho rychlost byla volena ve shodě se skutečným měřením do destrukce na potrubí DN 800. Při měření byly aplikovány jak klasické odporové tenzometry, tak také snímače velkých deformací, vyvinuté na bázi odporových tenzometrů. Získané výsledky a zejména závislost Poissonova čísla na napětí, které je možno určit jako nominální nebo skutečné přepočtem na skutečnou plochu, poslouží jako podklad při vyhodnocování experimentálních dat získaných měřeními na skutečném potrubí z tohoto materiálu.*

**Úvod**

V rámci vědecko-výzkumné činnosti katedry nauky o pružnosti a pevnosti strojní fakulty ČVUT v Praze se v uplynulých letech uskutečnilo několik destrukčních zkoušek částí potrubí DN 800 z materiálu X 60. Jednalo se buď o části potrubí poškozené velkoplošnou korozi nebo o části potrubí s uměle vytvořenými vadami přesně definovaného tvaru a velikosti. Při všech těchto zkouškách byly v okolí vad instalovány odporové tenzometry a snímače velkých deformací vyvinuté na bázi odporových tenzometrů /1/. K vyhodnocení naměřených hodnot byly jako vstupní parametry voleny  $E$ ,  $\mu$  a  $R$  získané tahovými zkouškami na vzorcích materiálu odebraných přímo z konkrétního měřeného úseku potrubí /2/. Vztah pro změnu Poissonova čísla v závislosti na zatížení byl do vyhodnocovacího programu převzat z literatury /3/ ve tvaru:

$$\sigma < R \dots \mu = 0.3$$

elastická oblast

$$\sigma > R \dots \mu' = \frac{1}{2} - \frac{1 - 2\mu}{2 \cdot E} \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

plastická oblast

Získané průběhy napětí však obsahovaly určité diskontinuity zejména v přechodu z elastického do plně plastického stavu. Při podrobném rozboru vzorců použitých ve vyhodnocovacím programu se ukázalo, že vzniklé diskontinuity způsobuje zejména použití vzorce pro změnu Poissonova čísla v závislosti na napětí a deformaci, kde je předpokládána změna  $\mu$  až po dosažení meze kluzu ve vzorku. Další nepřesnosti způsobovala náhrada reálného tahového diagramu kombinovaným modelem tvořeným třemi částmi (elastickou, elasticko-plastickou a plastickou). Na základě těchto zjištění bylo rozhodnuto provést sérii materiálových zkoušek, které by se svým charakterem co nejvíce přibližovaly skutečnému destruktivnímu testu potrubí a při kterých by byly sledovány všechny veličiny nutné pro další výpočty (závislosti  $\sigma$ - $\varepsilon$ ,  $\mu$ - $\sigma$ ,  $E$ - $\sigma$ , ...).

#### Příprava měření

Pro měření byly vyrobeny vzorky z materiálu X 60 o rozměrech příčného průřezu  $b \times h = 24 \times 13$  [mm]. Na tyto vzorky byly na dvě protilehlé stěny nainstalovány tenzometrické kříže KN 120 a na všechny čtyři stěny podélně i příčně orientované snímače velkých deformací. Zatěžující síla v trhacím zařízení byla měřena automaticky tenzometrickým snímačem tlaku, který byl nainstalován na tlakové čerpadlo a měřil tlak oleje přiváděného do pracovního válce. Přepočtem na plochu pístu byl výstup ze snímače zaznamenáván přímo v kN. Současně s přípravou vzorků vznikal také "řídící program" zkoušek, který umožňoval řídit resp. korigovat rychlost zatěžování a přes tenzometrickou ústřednu ÚPM 60 sledovat a odečítat měřené hodnoty. Takto získaná data se postupně ukládala do paměti

počítače a na závěr se zaznamenala na paměťový disk, kde byla připravena k dalšímu zpracování.

#### Vlastní měření

Rychlost zatěžování, se řídila teoretickým předpokladem nárůstu napětí ve vzorku přibližně 15 MPa/min, což v přepočtu na plochu průřezu vzorku odpovídalo nárůstu zátěžné síly v rozmezí (5-5,5) kN/min. Tak byl také stanoven, při přibližné znalosti meze pevnosti materiálu (650 MPa), celkový čas měření cca 50 min. Tenzometrické kříže byly zapojeny s jedním společným kompenzačním tenzometrem 4/. Snímače velkých deformací jsou konstruovány jako odporové polomosty a snímač tlaku jako celý most, a proto je nebylo třeba kompenzovat. Vlastní zatěžování bylo korigováno ručně přepouštěním oleje pod pístem podle výstupních informací z řídicího programu. Odečet probíhal automaticky přibližně po 30 sekundách (při kratším intervalu se jednalo o ruční zásah obsluhy do průběhu odečítání).

#### Zpracování naměřených hodnot

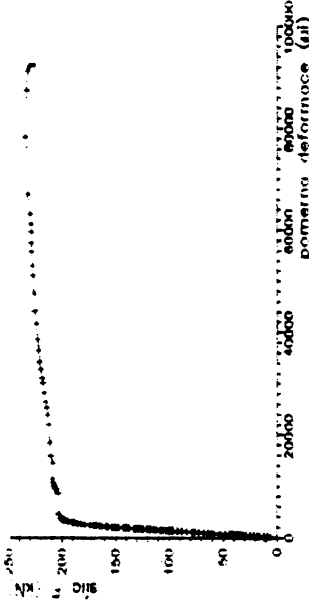
Celkem bylo sledováno 14 vstupních hodnot (4 hodnoty deformací z tenzometrických křížů, 8 hodnot deformací ze snímačů a tlak v pracovním válci převedený na sílu, čas se zaznamenával přímo z vnitřních hodin počítače). Zpracování naměřených hodnot bylo provedeno na počítači Commodore PC 40/AT, a to jednak pomocí vlastních programů "ZAZNAM" a "PRUMER" a jednak pomocí firemního software "GRAPHER". Odporové tenzometry z tenzometrických křížů byly vyhodnocovány pouze v oblasti spolehlivé činnosti (tj. 1%). Pro vyloučení případného ohybu byla vždy ze dvou podélných i příčných hodnot vypočtena průměrná hodnota. Tak byla popsána celá elastická oblast. Přechod do plastické oblasti a plastickou oblast již dobře popisovaly snímače velkých deformací, které vzhledem ke svému velkému zesílení vykazují při malých deformacích značné

chyby srovnatelné s měřenými hodnotami. Výsledná podélná a příčná deformace byla opět stanovena jako aritmetický průměr poměrných deformací ze snímačů na všech čtyřech stěnách. Závislost Poissonova čísla na záložné síle byla vždy počítána z průměrných hodnot poměrných deformací. V elastické oblasti s tensometrických křížů a v plastické oblasti ze snímačů kých deformací. Jednotlivé moduly pružnosti byly stanoveny linearizací "elastické oblasti".

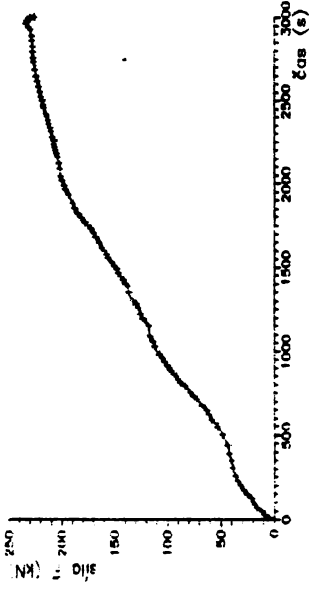
#### Výsledky měření

Přběh a výsledky prvních skoušek jsou patrný z obrázků 1 až 4. Při samostatném rozboru "elastické oblasti" je vidět, že i zde dochází k "zakřivení" tahového diagramu, což je patrné zejména z poměrných deformací v podélném směru. S ohledem na toto "zakřivení" nelze jednoznačně stanovit modul pružnosti, ale pouze hodnoty smluvní odpovídající určité trvalé poměrné deformaci:

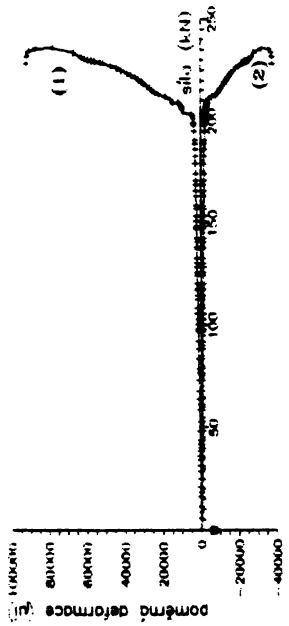
$E_{0.05} = 2.34 \text{ ES MPa}$  ;  $E_{0.1} = 2.24 \text{ ES MPa}$  ;  $E_{0.2} = 2.17 \text{ ES MPa}$   
Nejdůležitější výsledek však vyplývá z obrázku 4: v průběhu celého zatěžování dochází ke změně Poissonova čísla  $\mu$ . Již v elastické oblasti v důsledku zakřivení tahového diagramu se mění Poissonovo číslo v rozsahu 0.23 až 0.26. Výrazná změna v průběhu závislosti  $\mu$ - $F$  nastává ještě před počátkem rozvoje plastických deformací (již při 185 kN což odpovídá nominálnímu napětí 515 MPa). Hodnota  $\mu$  rychle narůstá a na počátku rozvoje plastických deformací (202 kN což je cca 560 MPa) dosahuje již hodnoty 0.34 a dále stoupá až do hodnoty 0.44 (pro 230 kN což je cca 640 MPa). Po 50 minutách a 6 sekundách došlo k zaškrcování vzorku a k jeho následnému přetržení (maximální síla byla 236.2 kN což odpovídá nominálnímu napětí cca 656 MPa). Porušení vzorku nastalo mimo oblast osazenou snímači velkých deformací, a proto také největší naměřené podélné deformace cca 9.2% neodpovídají ještě maximální tažnosti materiálu udávané výrobcem.



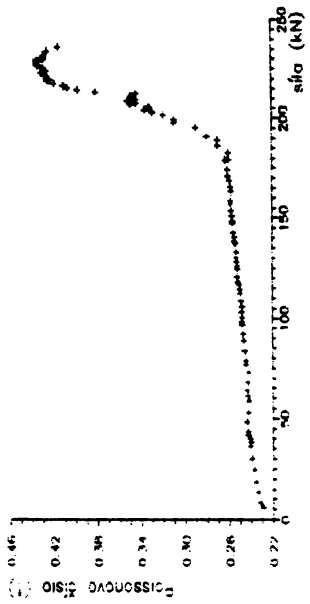
Obr. 1 Závislost tahové skoušky materiálu X 60



Obr. 2 Závislost zatěžující síly na čase



Obr. 3 Závislost poměrné podélné a příčné (2) deformace na síle



Obr. 4 Závislost Poissonova čísla na zatěžující síle

## Závěr

Naměřené a vypočtené hodnoty potvrdily předpoklady o specifickém chování materiálu X 60 v plastickém stavu. I když se jednalo o první zkoušku tohoto typu, lze již nyní učinit některé závěry:

1) Materiál X 60 vykazuje určité plastické vlastnosti již od počátku zatěžování a nelze tedy jednoznačně hovořit o elastické oblasti a definovat modul pružnosti a mez kluzu.

2) Hodnota Poissonova čísla  $\mu$  se mění v celém průběhu zatěžování a nelze tedy aplikovat na materiál X 60 teorii uvedenou v literatuře [2]. Roshodující nárůst Poissonovy konstanty nastává ještě dříve než dojde k úplnému rozvoji plastických deformací ve vzorku a přechod na maximální hodnotu proběhne v poměrně krátkém intervalu nárůstu zatížení.

3) Náhrada tahového pracovního diagramu elasticko-plastickým modelem se jeví jako nedostatečná s ohledem na vlastnosti "elastické" oblasti a s ohledem na rychlý nárůst plastických deformací po dosažení určité hladiny zatížení resp. napětí. Jako nejvhodnější se jeví náhrada pomocí spline-funkcí nebo polynomů vyšších řádů, které mohou popsat celý diagram.

Pro potvrzení těchto závěrů je třeba uskutečnit celou sérii takovýchto zkoušek, které by uvedené závěry potvrdily a případně odhalily další závislosti a vlivy (výroba vzorku a jeho orientace, povrchové zpracování vzorku, změna rychlosti, zpevnění materiálu při odlehčení z plastického stavu, aj.).

## Seznam použité literatury

- /1/ Řezníček, J. Experimentální analýza napětí na deternovaných vědách Tranzitního plynovodu - extensometry pro sledování velkých deformací  
Sborník konference EAN 88, Molany V/1988
- /2/ Vítek, K. Stanovení mechanických charakteristik materiálu X-60 pro napěťovou zkoušku  
Výzkumná správa ČVUT Praha, 1984
- /3/ Malinin, N., N. Prikladnaja teoriija plastičnosti i polzučesti  
Mašinostrojenije, Moskva 1975
- /4/ UPH 60 - Bedienungsanleitung  
firmaní návod HBN Darmstadt, 1982