

**VLIV IMPERFEKCÍ GEOMETRIE A MATERIÁLU NA DEFORMAČNÍ  
PROCESY V PLÁŠTI TRUBKY****Ing. Ľubomír Gajdoš CSc.****ÚTAM AVČR Praha****1. Úvod**

Jedním z nejhozpodárnějších způsobů přepravy kapaliných a plyn-ných médií na velké vzdálenosti je přeprava pomocí tenkostěnných tlakových potrubních systémů. Ve většině případů se v těchto sys-témech používají trubky svařované, a to buď s podélným nebo šrou-bovicovým svarem. Vlastní přetlak přepravovaného média vyvolává nejen membránové napětí, ale i řadu přídavných skořepinových napěti lokálních, způsobených geometrickými nedokonalostmi tvaru potrubí, jako je nekruhovost, střechovitost ve svarech, přesazení svarů, a pod. Neméně závažným je i stav vlastních pnutí vyvolaných svařo-váním.

V případech, kdy přepravovaným médiem je plyn, schopný naaku-mulovat velkou elasticí energii v systému, nebo kapalina, jejíž únik z potrubního systému by znamenal vážné narušení ekologické rov-nováhy, je nutné zajistit vysokou pevnostní spolehlivost tlakového potrubního systému. K posouzení nebezpečnosti eventuálních ostrých defektů, které by mohly během provozu potrubního systému vést k ha-várii, je potřeba znát vliv geometrických i materiálových imperfekcí na deformační chování pláště potrubí.

V příspěvku jsou uvedeny výsledky tenzometrického měření defor-mací na povrchu pláště šroubovicově svařované trubky DN600 z mate-riálu ČSN 411373 s oduhlíčeným pásem po obou stranách svaru při ne-máhání vnitřním přetlakem, a na základě analýzy deformací jsou od-hadnuta přídavná napětí ve stěně trubky. O tomto problému již bylo do jisté míry pojednáno v práci /1/. Těžiště předkládaného přispěv-ku je proto položeno do roviny hodnocení vlivu geometrických a ma-teriálových imperfekcí, realizovaných šroubovicovým svarem a oduhlí-čeným pásem, na deformační chování pláště trubky.

## 2. Popis experimentu a výsledky

Na povrch trubky  $\varnothing 630/7\text{mm}$  o délce 3,90m bylo přitímněno celkem 10 tenzometrů podle schématu, uvedeného na obr.1. Jednalo se o dvě růžice (1-2-3, 4-5-6) umístěné v těsné blízkosti svařového švu z obou stran, a dva kříže umístěné v jedné polovině (9-10) a v jedné čtvrtině (7-8) stoupání šroubovicového svaru od místa umístění růžic. Zatěžování trubky se uskutečnilo ve dvou základních cyklech. První - do blízkosti meze kluzu, druhý - do destrukce. Zjištěné hodnoty poměrných deformací na některých tlakových úrovích jsou uvedeny v již citované publikaci /1/.

Analýzou Mohrových kružnic byly získány hodnoty hlavních poměrných deformací  $\varepsilon_I$  a  $\varepsilon_{II}$  a také úhly hlavního směru I vzhledem k obvodovému směru trubky  $\varphi$ . Tyto hodnoty jsou uvedeny v tab.1. Graficky jsou získané výsledky prezentovány na obr.2 a obr.3.

Tab.1 Hlavní deformace  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_{II}$  a úhel hlavního směru I s obvodovým směrem trubky  $\varphi$

tlak (MPa)	místo					
	1 - 2 - 3			4 - 5 - 6		
	$\varepsilon_I$ ( $10^{-6}$ )	$\varepsilon_{II}$ ( $10^{-6}$ )	$\varphi$ (°)	$\varepsilon_I$ ( $10^{-6}$ )	$\varepsilon_{II}$ ( $10^{-6}$ )	$\varphi$ (°)
2,56	266	37	16,7	341	-117	8,4
3,20	329	49	15,8	427	-157	8,0
3,90	410	128	10,5	621	-231	-0,1
5,00	662	328	-11,8	918	-297	-6,6
5,50	925	362	-13,8	1 107	-325	-9,8
6,00	9 221	-556	12,5	9 915	-2 910	4,4
7,15	19 998	-281	8,2	18 240	-2 598	11,0

### 3. Poznámky k naměřeným deformacím v mimosvarové oblasti

Protože před tenzometrickým měřením na vyšetřované trubce se nepředpokládalo její anomální deformační chování, nebyly v mimosvarové oblasti přitmeleny žádné tenzometrické růžice, ale jenom kříže pro určení obvodové a osové deformace.

Údaje tenzometrů 7-10 v elasticke oblasti zatěžování jsou uvedeny ve formě bodů na obr.4 a obr.5. Jedná se o závislosti typu  $\varepsilon - p$ , které až do úrovně meze kluzu lze považovat za lineární. Pokud by se jednalo o ideální stav, t.j. o homogenní materiál a ideální geometrii trubky, byl by nárůst obvodové deformace  $\varepsilon_y$  s nárůstem přetlaku  $p$  (při uvažování  $\gamma=0,3$ ) asi 4,25 krát rychlejší, než nárůst osové deformace  $\varepsilon_x$ . Po dosažení meze kluzu v celém objemu pláště trubky by osová deformace poklesla na nulu a nárůst obvodové deformace by se snížil asi o 12%. Ze závislosti na obr.4 a obr.5 však plyne, že rychlosť nárůstu deformace v obvodovém směru byla jen 3,25 a 3,29 krát větší než rychlosť nárůstu osové deformace. Je proto reálný předpoklad, že hlavní směry deformací ani mimo oblast šroubovico-vého svaru nebudou shodné s obvodovým a osovým směrem trubky.

### 4. Odklon hlavních směrů od obvodového a osového směru

Na obr.6 je schematicky znázorněna Mohrova kružnice deformací pro místo přitmelení tenzometrů 7 a 8. Podobnou kružnicí lze uvažovat i pro lokalitu umístění tenzometrů 9 a 10. Jelikož tenzometry 7 a 8 a též tenzometry 9 a 10 jsou na sebe kolmé, jsou středy Mohrových kružnic deformací dány vztahy  $0,5(\varepsilon_7 + \varepsilon_8)$  a  $0,5(\varepsilon_9 + \varepsilon_{10})$ . Pro určení odklonu hlavního směru I od obvodového směru y hledáme na Mohrově kružnici takový úhel  $2\gamma$ , pro který je  $\varepsilon_I / \varepsilon_{II} = 4,25$ . Dle obr.6 je zřejmě

$$\cos 2\gamma = \frac{5,25(\varepsilon_8 - \varepsilon_7)}{3,25(\varepsilon_8 + \varepsilon_7)} \quad \dots \quad (1)$$

$$\cos 2\gamma = \frac{5,25(\varepsilon_9 - \varepsilon_{10})}{3,25(\varepsilon_9 + \varepsilon_{10})} \quad \dots \quad (2)$$

Jelikož dle obr.4 je  $\varepsilon_8 / \varepsilon_7 \approx 3,29$  a analogicky dle obr.5 je  $\varepsilon_9 / \varepsilon_{10} \approx 3,25$ , z rov.(1) a (2) lze dospět k hodnotám

$$\cos 2\varphi = \frac{5,25}{3,25} \cdot \frac{(3,29 - 1)}{(3,29 + 1)} = 0,862292 \quad \dots \text{ pro 7-8}$$

a

$$\cos 2\varphi = \frac{5,25}{3,25} \cdot \frac{(3,25 - 1)}{(3,25 + 1)} = 0,855204 \quad \dots \text{ pro 9-10}$$

Odpovídající úhly  $\varphi$  jsou:

$$\varphi = 15,2^\circ \quad \text{pro tenzometry 7-8}$$

$$\varphi = 15,6^\circ \quad \text{pro tenzometry 9-10}$$

Vidíme, že i v mimosvarové oblasti se směry hlavních napětí a deformací liší od obvodového a osového směru, což ukazuje na přítomnost přidavných napětí i v této oblasti. Z měření na tenzometrických křížích však není bohužel možné určit smysl odklonu hlavních směrů. Lze proto pouze předpokládat, že tento odklon je kvalitativně stejný jako v blízkosti šroubovicového svaru, t.j. že úhel mezi hlavním směrem I a osou trubky je větší než pravý úhel.

### 5. Přidavná napětí v pláště trubky

Ideální napjatost v homogenní tenkostěnné trubce se změní, vyskytnou-li se ve stěně trubky výrazné nehomogenity, jako např. svary. Přítomnost svarů ve stěně trubky zpravidla působí jako výztužný prvek, což je například příčinou známého "buřtového" efektu šroubovicového svaru u trubky, zatěžované vnitřním přetlakem nadmez kluzu. Tento efekt spočívá v tom, že v důsledku vyšší meze kluzu svarového kovu dojde při zatěžování trubky nadmez kluzu k větším plastickým deformacím v základním materiálu než ve svaru, což se projeví nafukováním trubky v oblasti mezi svary.

Ve vyšetřovaném případě trubky DN600 byla situace poněkud jiná. Jelikož podél šroubovicového svaru se nacházel odhlučený pás v šířce asi 80mm, přičemž šroubovicový svarový řev ležel uprostřed tohoto

pásu, po překročení meze kluzu odlišeného pásu došlo k jeho větším plastickým deformacím a k vyboulování stěny trubky v této oblasti, přičemž oblast stěny trubky mezi svarovými švy zůstala deformačně málo ovlivněna.

V této souvislosti je zajímavé podívat se na vliv nehomogenit ve stěně trubky z hlediska přídavných napětí. V zásadě je možné nahradit účinky geometrických i materiálových nehomogenit a zbytkových pnutí od svařování působením jednoho napěťového vektoru, který se sčítá s napěťovým vektorem od vnitřního přetlaku. Součtový vektor pak určuje pozorované úrovně poměrných deformací ve vyšetřovaných směrech. Na základě této představy byly v již citované práci /1/ určeny průběhy přídavných napětí od materiálových i geometrických imperfekcí a od svařování v těsné blízkosti šroubovicového svarového švu v závislosti na vnitřním přetlaku. Jednalo se o napětí působící podél a kolmo na svarový šv. Zde uvedeme průběhy přídavných napětí v obvodovém a osovém směru trubky - viz obr.7. Na tomto obrázku jsou symboly  $\tilde{\sigma}_h$ ,  $\tilde{\sigma}_x$ ,  $\tilde{\tau}_{xh}$  označeny přídavná napětí v obvodovém a osovém směru, a dále smykové napětí v rovině kolmé na obvodový směr a v rovině kolmé na osový směr. Jak je odsud patrné, jsou tato součtová přídavná napětí převážně tlakového charakteru a vykazují extrémální typ chování v závislosti na aplikovaném vnitřním přetlaku. Extremu dosahují ještě před dosažením meze kluzu.

Základní obraz o velikosti přídavných napětí působících ve stěně trubky v oblasti mezi šroubovicovými svarovými švy lze získat na základě představy o tom, že pozorované hodnoty poměrných deformací a směry hlavních deformací jsou vyvolány součtovým napěťovým vektorem od přídavných napětí a od působícího vnitřního přetlaku. Označíme-li obvodové napětí od vnitřního přetlaku symbolem  $\tilde{\sigma}_h^P$  a přídavné obvodové napětí symbolem  $\tilde{\sigma}_h^S$ , pak výsledné napětí bude dáné vztahem:

$$\tilde{\sigma}_h = \tilde{\sigma}_h^P + \tilde{\sigma}_h^S \quad \dots \quad (3)$$

Podobně bude pro osové napětí  $\tilde{\sigma}_x$ :

$$\tilde{\sigma}_x = \tilde{\sigma}_x^P + \tilde{\sigma}_x^S \quad \dots \quad (4)$$

Uvažujeme

$$\begin{aligned} \rho_{\tilde{G}_h} &= \frac{\rho D}{2t} \\ \rho_{\tilde{G}_x} &= \frac{\rho D}{4t} \end{aligned} \quad \dots \quad (5)$$

Protože jde o dvojosou napjatost, jsou hodnoty napětí  $\tilde{G}_h$ ,  $\tilde{G}_x$  a  $\tilde{\tau}_{xh}$  svázány s poměrnými deformacemi vztahy:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{G}_h &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_h + \nu \cdot \varepsilon_x) \\ \tilde{G}_x &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_h) \\ \tilde{\tau}_{xh} &= G \cdot \gamma_{xh} \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (6)$$

S uvážením zjištěného poměru  $\varepsilon_h / \varepsilon_x = 3.29$  pro lokalitu ležící v jedné čtvrtině stoupání šroubovicového svaru, a poměru  $\varepsilon_h / \varepsilon_x = 3.25$  pro lokalitu ležící v jedné polovině stoupání šroubovicového svaru, lze dle rovnic 3-6 dospět ke vztahům uvedeným v tab.2.

Tab.2 Přídavné napětí mimo oblast svaru

Napětí	Lokalita	
	7 - 8	9 - 10
$\tilde{z}\tilde{G}_h$	-4,36 · p	-6,58 · p
$\tilde{z}\tilde{G}_x$	-0,008 · p	-1,127 · p
$\tilde{z}\tilde{\tau}_{xh}$	2,688 · p	2,605 · p

Uvedené vztahy jsou graficky zobrazeny na obr.8.

## 6. Závěrečné poznámky

Z uskutečněné experimentální studie deformačního chování ten-kostěnné trubky s imperfekcemi geometrie a materiálu při namáhání vnitřním přetlakem lze učinit tyto závěry:

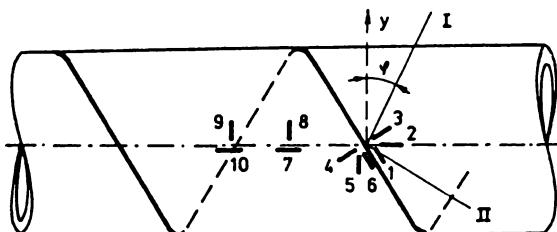
a) Vlivem přítomnosti šroubovicového svaru ve stěně trubky dochází k ovlivnění napjatosti trubky. Tento vliv je dán přídavnými napětími od výrobních operací (zkružování, svařování), změnou tuhosti stěny v důsledku výskytu svaru a nekruhovitosti průřezu trubky. Směry hlavních napětí ve svarové oblasti závisí na okamžité úrovni tlaku. Při nízkých úrovniach tlaku je směr hlavního napětí I stočen od obvodového směru trubky ke šroubovicovému svaru. S rostoucím tlakem se stáčí do obvodového směru, kterého dosahuje při tlaku kolem 4MPa, tedy ještě před dosažením meze kluzu. Uvedený trend pokračuje až do tlaku na úrovni meze kluzu. Po překročení meze kluzu nastává změna hlavního směru I zpět k výchozímu stavu.

V mimosvarové oblasti při zatěžování v elastických podmínkách je odklon hlavních směrů konstantní, t.zn. nezávislý na úrovni vnitřního přetlaku a činí asi  $15^{\circ}$ .

b) Přídavná napětí od zkružování, svařování a ovality průřezu trubky jsou tlakového charakteru jak ve svarové tak i mimosvarové oblasti, přičemž v blízkosti svaru vykazují extremální typ chování v závislosti na aplikovaném vnitřním přetlaku. V mimosvarové oblasti lze chování přídavných tlakových napětí charakterizovat monotonním lineárním nárůstem s rostoucím vnitřním přetlakem.

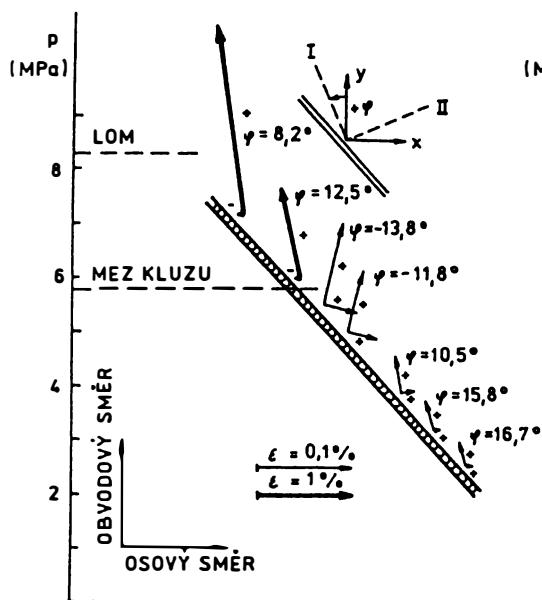
## 7. Literatura

- /1/ Ľ.Gajdoš, M.Srnec, J.Jíra: Analýza deformačního chování šroubovicově svařované trubky při namáhání vnitřním přetlakem, PLYN, roč.73, č.3, 1993, s.74-81



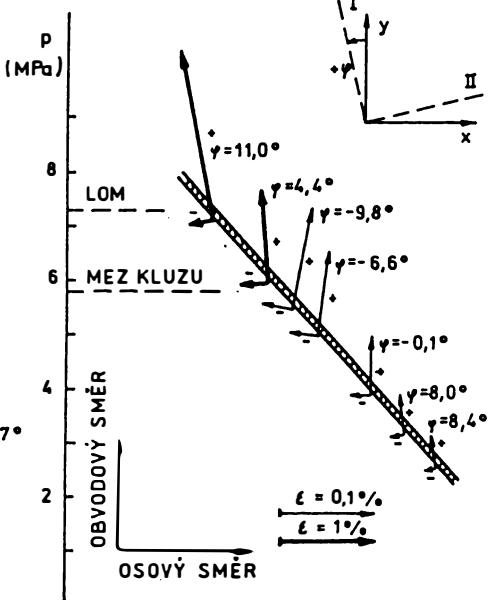
OBR. 1

HLAVNÍ DEFORMACE  
(RŮŽICE 1-2-3)

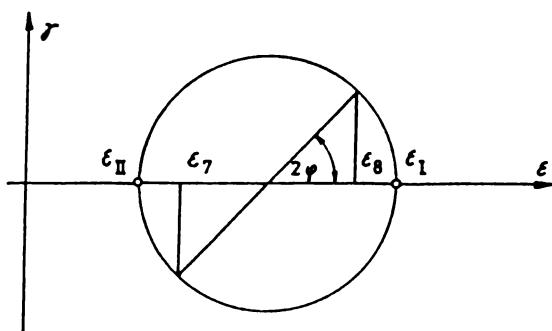
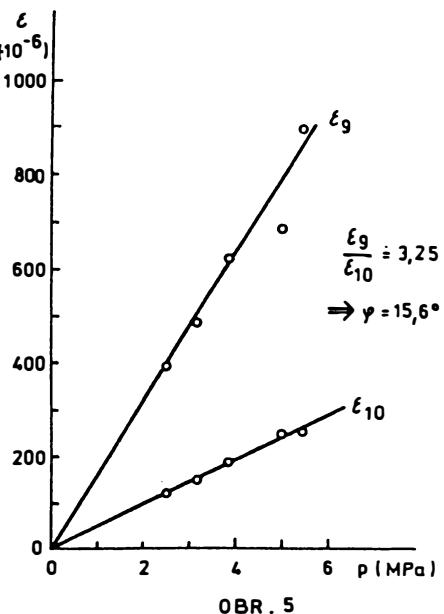
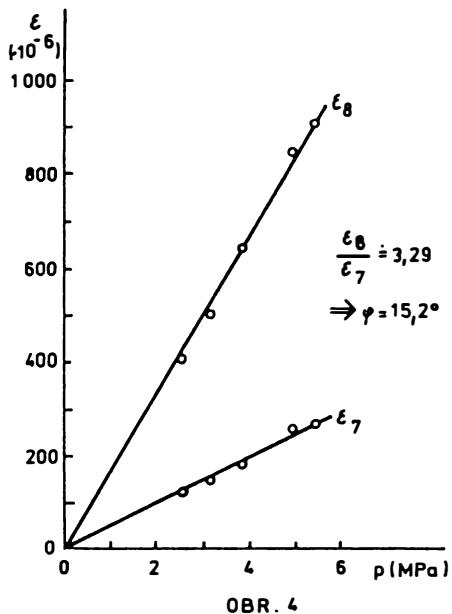


OBR. 2

HLAVNÍ DEFORMACE  
(RŮŽICE 4-5-6)



OBR. 3



OBR. 6

