

## ZMĚNY ZBYTKOVÝCH PNUTÍ VE ŠROUBOVICOVĚ SVAŘOVANÝCH TRUBKÁCH PŘI TLAKOVÁNÍ V OBLASTI MEZE KLUZU

### CHANGES OF RESIDUAL STRESSES IN SPIRAL-WELDED PIPES BY PRESSURIZING IN THE RANGE OF YIELD POINT

Václav LINHART, Jana SIGMUNDOVÁ<sup>1</sup>

#### *Abstrakt*

Metoda měření pnutí odvrátáním byla využita ke stanovení pnutí ve šroubovicově svařovaných trubkách DN 700 a DN 500 z ocelí L415MB a L450MB. Pnutí v trubkách po výrobě a po tlakování k mezi kluzu. Dobrá srovnatelnost průběhů a úrovní pnutí. Změna pnutí při „napět'ové zkoušce“ trubek a po cyklickém tlakování.

**Klíčová slova:** zbytkové pnutí, měření, šroubovicově svařované trubky, napět'ová zkouška, cyklické tlakování.

#### *Abstract*

To estimate residual stresses in the DN 700 and DN 500 spiral-welded pipes made of L415MB and L450MB steels, stress measuring by hole drilling method has been used. Post-production residual stress and the post-pressurizing (up to yield point) that. Good comparability of the stress courses and levels. Residual stresses change during the „stress test“ of pipes and after cyclic pressurizing.

**Keywords:** residual stresses, measuring, spiral-welded pipes, stress test, cyclic pressurizing.

## ÚVOD

Při výrobě šroubovicově svařovaných trub pro plynovody a produktovody dochází ke vzniku pnutí při výrobě pásu, jeho stáčení do šroubovice a při svařování. Lze očekávat, že u nových ocelí s vyššími pevnostními hodnotami bude úroveň pnutí narůstat. Trubky se po dokončení výroby nežihají a ke snížení pnutí a také k ověření celistvosti se podrobují v hutích tlakové zkoušce až k mezi kluzu základního materiálu. Při kompletaci trasy vznikají další pnutí při montáži a při svařování obvodových svarů. Ke snížení celkové úrovně pnutí v dokončeném potrubí se často uskutečňuje tzv. „napět'ová zkouška“ („stress test“). Jak při tlakování v hutích, tak i při tomto testu jde o přestavbu a částečnou eliminaci pnutí plastickou deformací.

Maximální snížení pnutí v trubkách je důležité zejména z důvodu potlačení vzniku korozně napět'ových trhlin po dlouhé době provozu, ale také z důvodu deformací při svařování.

K objasnění účinku tlakových zkoušek se v SVÚM a.s. uskutečnilo měření pnutí u trubek DN 700 a DN 500 z ocelí L415MB a L450MB vyrobených v podniku Mittal Steel Ostrava, a.s., v rámci projektu k vývoji šroubovicově svařovaných trubek s vyššími pevnostními vlastnostmi. Základní údaje o použitých trubkách jsou v tab. 1.

<sup>1</sup> Ing. Václav LINHART, CSc., Ing. Jana SIGMUNDOVÁ, SVÚM a.s., Praha, [strength@svum.cz](mailto:strength@svum.cz), [sigmundova@svum.cz](mailto:sigmundova@svum.cz)

Lektoroval: Dr.h.c. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc., KAMaM, SJF TU v Košiciach, [frantisek.trebuna@tuke.sk](mailto:frantisek.trebuna@tuke.sk)

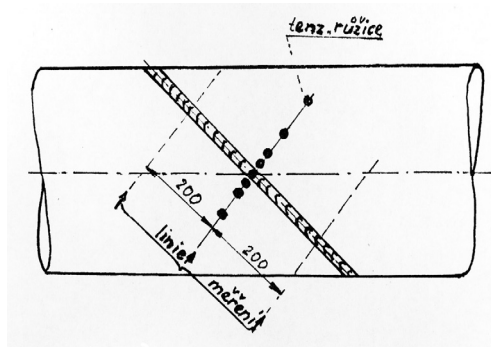
Základní údaje o použitých trubkách

Tabulka 1

Ocel	DN	Rozměry [mm]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_{t0,5}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$R_t/R_m$	$A$ [%]
L415MB	DN 700	710x11	433,8	436,5	538,4	0,81	29,2
L450MB	DN 500	508x10	472	475,1	583,6	0,81	25,1

## METODIKA MĚŘENÍ PNUTÍ

Měření pnutí se uskutečnilo na vnějším povrchu trubek, a to v okolí šroubovicového svaru (obr. 1). Další série měření se uskutečnila na linii ve vzdálenosti ca 200 mm (obr. 1). K měření byla použita odvrtávací metoda popsaná např. ve standardu ASTM E 837-85 [1] a v dalších podkladech [2]. K odvrtání byl použit přípravek vyvinutý v SVÚM a.s. s mikrovrtačkou (obr. 2) a speciální tenzometrické růžice od fy Hottinger-Baldwin, typu 1-RY 61-1,5/120, tj. s tenzometry  $l=1,5$  mm s  $R=120$   $\sigma$ . Uprostřed tří souměrně rozložených tenzometrů je kovový límeček s vodicím středícím otvorem k přesnému nastavení nástroje. Data z měření se ukládala do počítače.



Obr.1 Schéma měření pnutí v okolí šroubovicového svaru



Obr.2 Přípravek SVÚM a.s. k měření pnutí odvrtáváním

Z naměřených deformací  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  byly pak podle [1,2] stanoveny složky pnutí

$$\sigma_{\min}, \sigma_{\max} = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{4A} \pm \frac{1}{4} \bar{B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (1)$$

Hodnoty  $\bar{A}, \bar{B}$  byly stanoveny dle [2]:

$$\bar{A} = - \left[ \bar{a} \left( 1 + \frac{\mu}{2E} \right) \right] \quad (2)$$

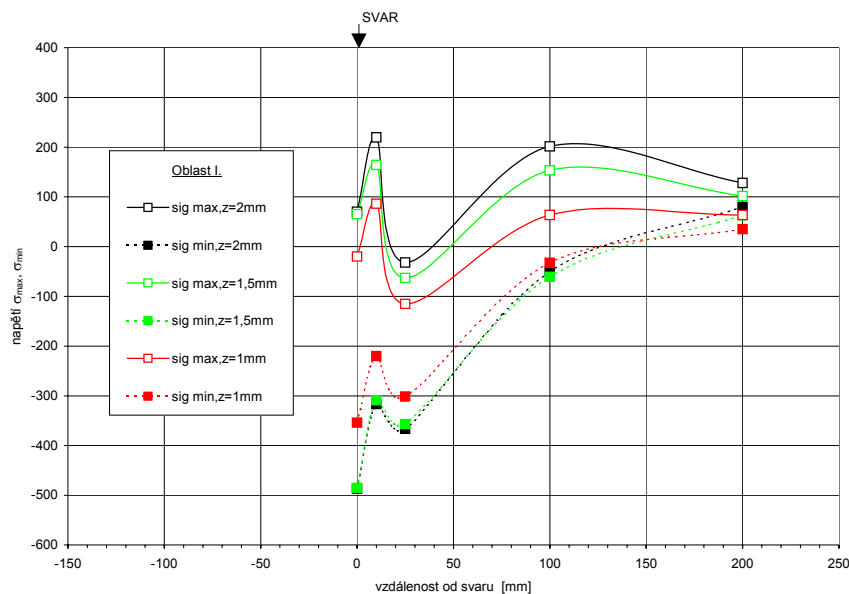
$$\bar{B} = - \left[ \frac{1}{2} E \bar{b} \right] \quad (3)$$

$\bar{a}, \bar{b}$  byly stanoveny z grafů dle [2].

## OVĚŘENÍ OPTIMÁLNÍ HLOUBKY PŘI ODVRTÁNÍ

Na trubce DN 700 z oceli L415MB se uskutečnilo orientační měření průběhu pnutí po odvrtání do hloubky  $z=1, 1,5$  a  $2$  mm, tj. při hodnotách  $z/D_o=0,196, 0,294$ , a  $0,329$ .

Výsledky měření v místech různě vzdálených od svaru dle obr.1 jsou na obr. 3. Z obr. 3 je zřejmá dobrá shoda průběhů pnutí s tím, že úroveň vyhodnocených pnutí postupně narůstá, ale příslušné přírůstky při odvrtání do větší hloubky postupně ustávají. Při vlastním měření byla standardně zvolena hloubka odvrtání  $z=2$  mm, tj.  $z/D_o=0,392$ .



Obr.3 Měření pnutí na dodané trubce DN 700 z oceli L415MB – různé hloubky odvrtání

## PNUTÍ NA TRUBKÁCH Z VÝROBY

Měření se uskutečnilo na trubkách po výrobě netlakovaných, a to na trubce DN 700 z oceli L415MB, a na dvou trubkách DN 500 z oceli L450MB.

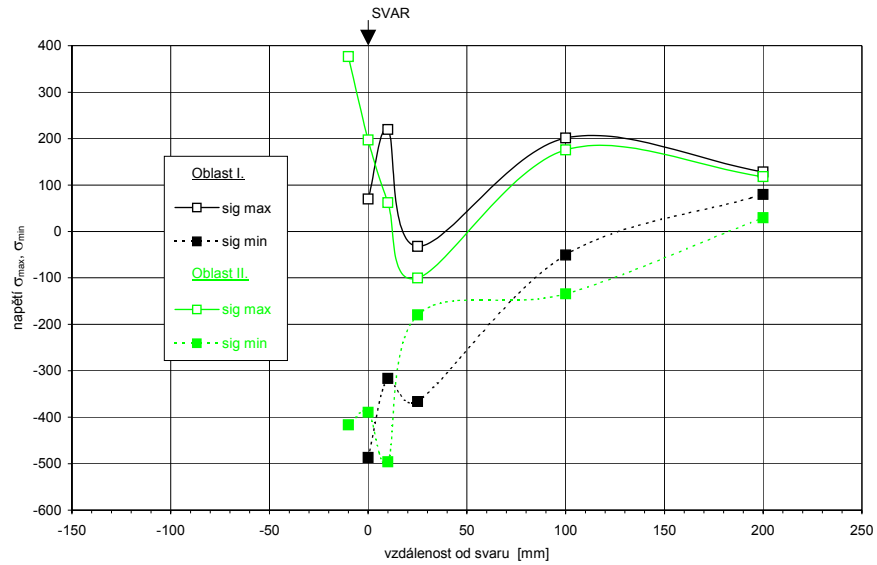
Výsledky na trubce DN 700 z oceli L415MB v oblastech protilehlých přes průměr (obr.4) daly vzájemně uspokojivý souhlas co do průběhu a úrovně získaných hodnot.

Přijatelná shoda průběhů a úrovně hodnot pnutí byla také získána na dvou, pořadím navazujících trubkách DN 500 z oceli L450MB (obr.5).

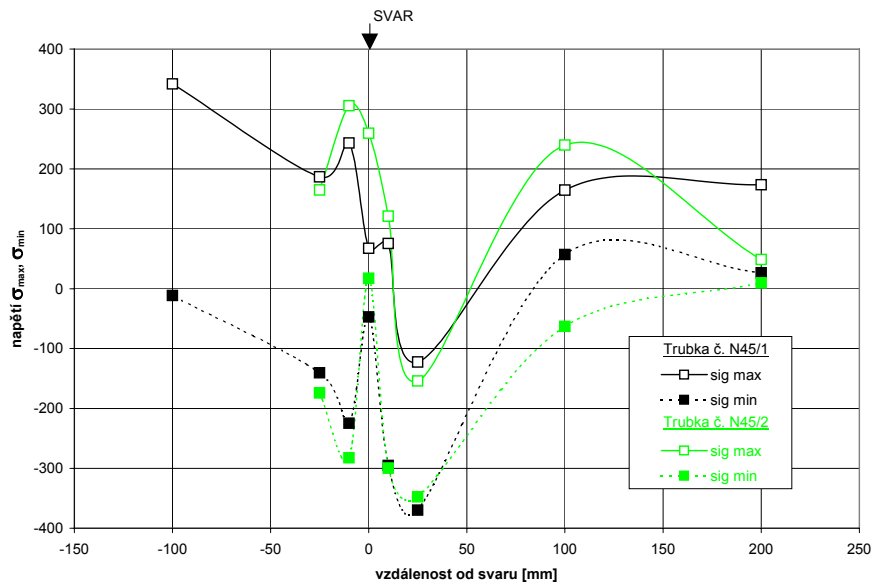
Některé hodnoty pnutí na trubce DN 700 přesahují mez  $R_{p0,2}$  (případ  $\sigma_{min}$ ). V těchto případech patrně došlo na otvorech při uvolnění pnutí odvrtáním k reverzní plastické deformaci a tím ke zkreslení výsledků. V lokálních místech mohou ovšem nastat podle našich zkušeností i značné rozdíly v naměřeném pnutí, např. v místech otláčených drah skružovacích kladek, nebo účinkem rozdílů při ochlazování pásu sprchou na konci válcování.

Z výsledků na obr. 4 a 5 je zřejmé, že změna meze kluzu z  $R_{p0,2}=415$  MPa na  $R_{p0,2}=450$  MPa nevedla k významnější změně v rozložení ani v úrovni pnutí. Nejvyšší hodnoty pnutí ve svarech dosahovaly u trubky z oceli L415MB (DN 700)  $+380$  MPa ( $\sigma_{max}$ ) a  $-500$  MPa ( $\sigma_{min}$ ) (obr. 4), u trubek z oceli L450MB (DN 500) hodnot  $+350$  MPa ( $\sigma_{max}$ ) a  $-400$  MPa ( $\sigma_{min}$ )

(obr.5). Průběh se v porovnávaných případech vyznačuje špičkou pnutí ve svaru, poklesem hodnot v jeho bezprostředním okolí (25mm) a opětovným nárůstem v oblasti vzdálené ca 100 mm od svaru. Důvodem je, že průběh pnutí je ovlivněn jak procesem svařování, tak předchozím procesem skružování pásu. O tom mj. svědčí i asymetrie průběhu pnutí po obou stranách svaru.



Obr.4 Pnutí na dodané trubce DN 700 z oceli L415MB



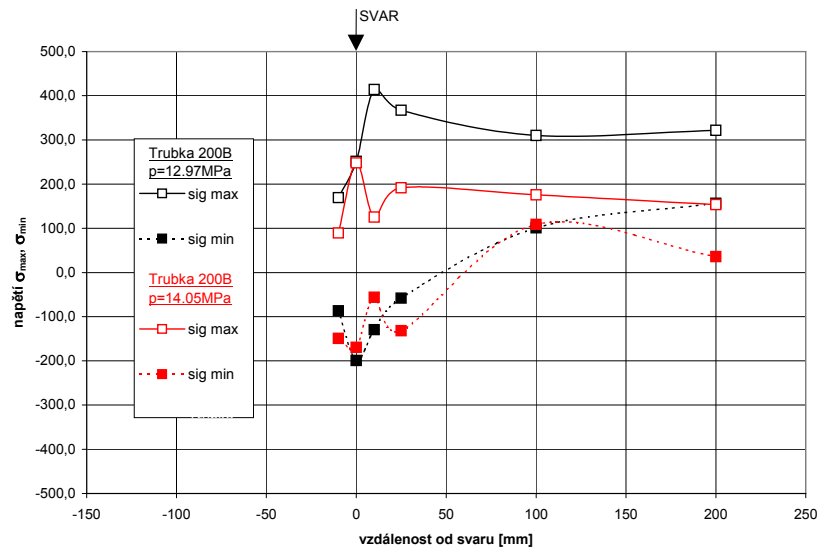
Obr.5 Pnutí na dvou dodaných trubkách DN 500 z oceli L450MB

## PNUTÍ NA TRUBKÁCH PO TLAKOVÁNÍ V OBLASTI MEZE KLUZU

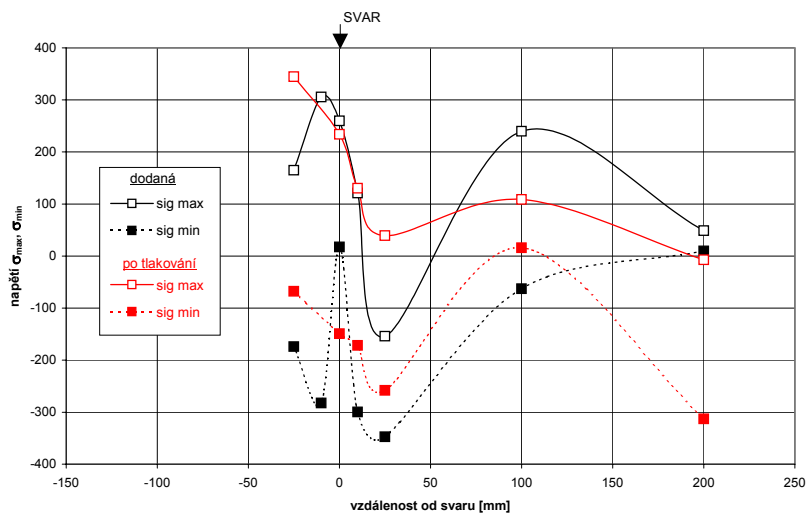
Tlakování v hutích se uskutečňuje obvykle do hodnoty odpovídající  $\sigma_{obv} \sim 0,95 Re$ . Tlakování probíhá po dobu jen 60, max. 90 sekund.

Na dvou trubkách DN 700 z oceli L415MB a dále na trubce DN 500 z oceli L450MB byla ověřena úroveň pnutí po tlakování k mezi kluzu na hodnoty  $\sigma_{obv} = 0,95$  až  $0,98 R_p 0,2$  (výdrž 60s).

Na obr.6 a obr.7 je možno porovnat úroveň pnutí po tlakování na hodnoty odpovídající  $\sigma_{obv} = 0,98 R_p 0,2$ , resp.  $0,95 R_p 0,2$  u trubek DN 700 z oceli L415MB a DN 500 z oceli L450MB. Podle obr. 6 dosahuje pnutí ve svaru po tomto tlakování u trubky DN 700 stále ještě hodnoty 400 MPa, u trubky DN 500 hodnoty až 350 MPa. Na obr. 7 můžeme porovnat pnutí v trubce před tlakováním k mezi kluzu a po tomto tlakování. Pnutí v oblasti svaru se po tlakování k mezi kluzu významně nesnížilo. Mimo svar je však snížení po tlakování v některých místech významné.



Obr.6 Pnutí na trubce DN 700 z oceli L415MB po tlakování na  $p=12,97 \text{ MPa}$  ( $\sigma_{obv} = 0,98 R_p 0,2$ ) a dále na  $p=14,05 \text{ MPa}$  ( $\sigma_{obv} = 1,056 R_p 0,2$ )



Obr.7 Pnutí na dodané trubce DN 500 z oceli L450MB a po tlakování na  $p=17$  MPa  
( $\sigma_{obv} = 0,95 R_p 0,2$ )

## PNUTÍ NA TRUBKÁCH PO TLAKOVÁNÍ NAD MEZ KLUZU

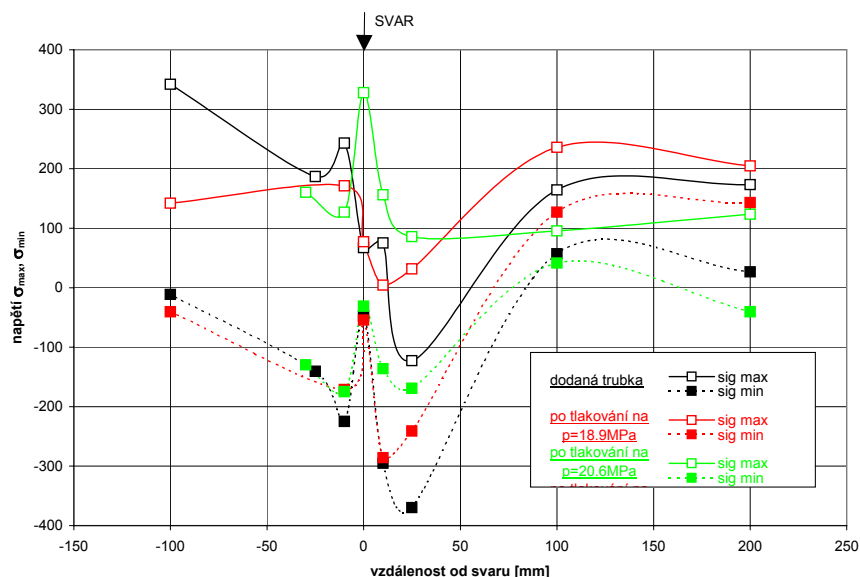
Při tlakování do oblasti  $\sigma_{obv} > R_p 0,2$  dochází již k plastické deformaci i na volném plášti trubky. To pak vede k výrazné redistribuci a k dalšímu snížení pnutí.

Změny pnutí, ke kterým došlo u trubky DN 700 z oceli L415MB po dalším tlakování, které odpovídalo hodnotě  $\sigma_{obv} = 1,056 R_p 0,2$ , jsou patrné z obr. 6. Ve svaru došlo k poklesu pnutí z předchozích 400 MPa na cca 210 MPa. Také v oblasti mimo svar je pokles úrovně pnutí výrazný - až na 100 ÷ 150 MPa.

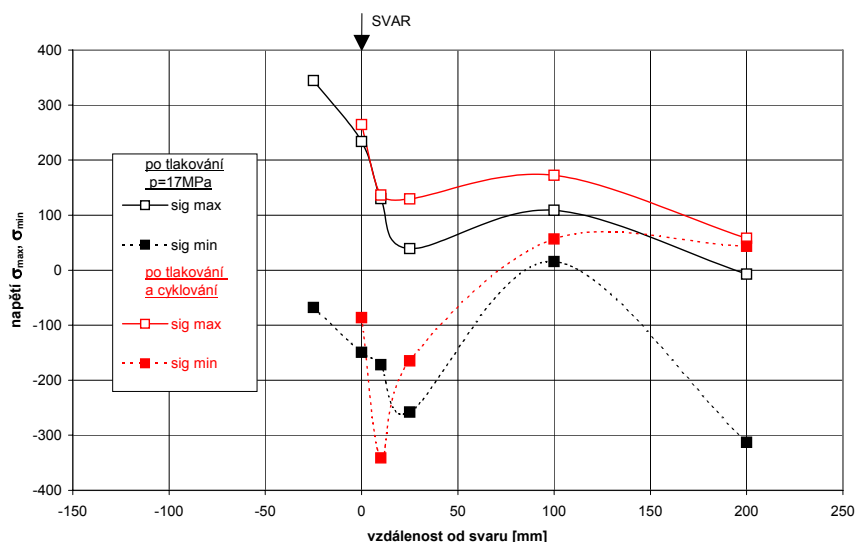
Rozložení pnutí po obdobném tlakování na trubce DN 500 z oceli L450MB až k hodnotám  $\sigma_{obv} = 1,05 R_p 0,2$  a následně na  $1,14 R_p 0,2$  (výdrž vždy 5 min) je patrné z výsledků měření na obr. 8. Na hodnotách  $\sigma_{min}$  lze po tlakování pozorovat určité snížení úrovně pnutí. U hodnot  $\sigma_{max}$  nebyl výraznější pokles zaznamenán. Celková úroveň pnutí je však po tlakování na tyto hodnoty, s výjimkou hodnoty ve svaru, nízká, do  $\sigma = 250$  MPa.

## VLIV CYKLOVÁNÍ AŽ NA PROVOZNÍ TLAK NA PNUTÍ

Tlak v plynovém potrubí za provozu mírně kolísá v závislosti na odběru. Na trubce DN 500 z oceli L450MB podrobené dříve tlakování k mezi kluzu bylo proto ověřeno, do jaké míry tato proměnlivost namáhání snižuje při vyšším počtu cyklů zbylá pnutí v trubce. K takovému účinku může dojít z důvodu cyklických mikropplastických deformací.



Obr.8 Pnutí na trubce DN 500 z oceli L450MB: dodaná trubka, trubka po tlakování na  $p=18,9$  MPa ( $\sigma_{obv} = 1,05 R_p 0,2$ ) a po dalším tlakování na  $p=20,6$  MPa ( $\sigma_{obv} = 1,14 R_p 0,2$ )



Obr.9 Pnutí na dodané trubce DN 500 z oceli L450MB po tlakování na  $p=17$  MPa ( $\sigma_{obv} = 0,95 R_p 0,2$ ) a po následném cyklování  $p_{max} / p_{min} = 6,3 / 1$  MPa,  $N=3500$  cyklů

Cyklické tlakování se uskutečnilo do provozního tlaku, tj.  $p_{max}=6,3$  MPa, při  $p_{min}=1$  MPa a při celkovém počtu  $N=3500$  cyklů. V porovnání s provozem to jsou velice zpřísněné podmínky.

Podle obr. 9 se vliv tohoto cyklování neprojevil výraznějším snížením pnutí. Zjištěné změny mohou spíše souviset s přirozeným kolísáním hodnot v jednotlivých místech trubky od výroby. Při běžných provozních podmínkách nelze proto s relaxačním snížením pnutí počítat.

## ZÁVĚR

1. Metodika měření pnutí odvtáváním byla využita ke stanovení rozložení pnutí ve šroubovicově svařovaných trubkách DN 700 a DN 500 z oceli L415MB a L450MB v okolí svaru.
2. Měření ve dvou místech po obvodě trubky DN 700 (obr. 4) a na dvou následně odebraných trubkách DN 500 (obr. 5) svědčí o dobré srovnatelnosti získaných výsledků.
3. Pnutí u trubek DN 700 z oceli L415MB, ve výrobě netlakovaných, dosahuje hodnoty  $+380$  MPa ( $\sigma_{max}$ ) až  $-500$  MPa ( $\sigma_{min}$ ), u trubek DN 500 z oceli L450MB až  $+350$  MPa ( $\sigma_{max}$ ) a  $-400$  MPa ( $\sigma_{min}$ ).
4. Tlakování odpovídající  $\sigma_{obv} \sim (0,95 \text{ až } 0,98) R_p 0,2$  vedlo u trubky DN 500 z oceli L450MB ke snížení pnutí mimo svar. Úroveň pnutí ve svaru nedoznala výraznější změny.
5. Tlakování trubek odpovídající  $\sigma_{obv} \sim (1,05 \text{ až } 1,14) R_p 0,2$ , v oblasti „napěťových zkoušek“ u trubky DN 500 z oceli L415MB vedlo ke značnému snížení celkové úrovně pnutí ze  $400$  MPa na  $210$  MPa. U trubky DN 500 z oceli L450MB došlo ke snížení úrovně pnutí mimo svar, ve svaru nebyla podstatnější změna zjištěna.
6. Cyklické tlakování do úrovně provozního tlaku se ani po  $3500$  cyklech neprojeвило snížením úrovně pnutí.

Práce byla součástí řešení projektu MPO FT-TA/091 v SVÚM a.s. Hlavním řešitelem projektu je Mittal Steel Ostrava.

### LITERATURA

- [1] Standard ASTM E 837-85. *Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method*, 1985.
- [2] *Measurement of Residual Stresses by Hole Drilling Gage Method*. Tech. Note TN-503-5 firmy Vishay, 1985.
- [3] LINHART, V., ČERNÝ, I., SIGMUNDOVÁ, J.: *Stanovení citlivosti potrubní oceli s  $R_e=415$  MPa k SCC a pnutí ve vyrobené trubce DN 700*. Výzkumná zpráva SVÚM a.s. k projektu MPO FT-TA/091 (ISPAT Nová Huť Ostrava a.s.), 2004.
- [4] LINHART, V., ČERNÝ, I., SIGMUNDOVÁ, J.: *Stanovení citlivosti oceli s  $R_e = 450$  MPa k SCC a zjištění pnutí v trubce DN 500 z této oceli po zvolených stupních tlakování*. Výzkumná zpráva SVÚM a.s. k projektu MPO FT-TA/091 (MITTAL Steel Ostrava a.s.), 2005.