

Experimentální Analýza Napětí 2007

STRESS TESTS OF PIPES WITH INCREASED STRENGTH PROPERTIES

STRESSTESTY U POTRUBNÍCH TĚLES Z OCELÍ S VYŠŠÍMI PEVNOSTNÍMI VLASTNOSTMI

Václav Linhart,¹ Jana Sigmundová²

Abstract: *Stress test as a method to reduce residual stresses and verification of integrity of long pipelines. Strain changes in spiral welded pipes with increased strength properties during pressure tests up to and over yield stress. Results of residual stress measurement after stress tests at various loading levels of these pipes from high strength steels.*

Efficient management of stress tests of pipes from these steels with high R_e/R_m ratio.

Keywords: *high strength steel, pipe, residual stress*

1. Úvod

V současné době se v podniku Mittal Steel Ostrava a.s. dokončil vývoj skupiny termomechanicky zpracovaný potrubních ocelí se zvýšenou mezí kluzu L360MB, L415MB, L450MB, a také šroubovicově svařovaných trubek z těchto ocelí. Jedná se o oceli s vysokým poměrem $R_{t0,5}/R_m$. Počítá se s jejich širokým uplatněním v plynovodech a v produktovodech. SVÚM a.s. na tomto vývojovém programu spolupracoval.

U ocelí se zvýšenou mezí kluzu je nutné počítat s tím, že výsledná pnutí z výroby budou s mezí kluzu narůstat, stejně tak jako pnutí od montážních obvodových svarů při ukládání potrubí na trasách. Výsledná napětí po superpozici s namáháním provozním pak mohou dosahovat nebezpečně vysokých hodnot.

Pro aplikaci těchto trubek jsme získali podklady pro posouzení účinnosti tlakových zkoušek k snížení pnutí ve výrobě a zejména podklady pro optimalizaci napěťových tlakových zkoušek (stresstestů) při výstavbě plynovodů s přihlédnutím k vlastnostem ocelí [1]. V našem příspěvku se zabýváme těmito problémy na trubkách z ocelí L450MB a L485MB.

U termomechanicky zpracovaných ocelí, o které se v našem případě jedná, nelze ke snížení pnutí využít žihání. To by vedlo k degradaci příznivých vlastností, které termomechanické zpracování přináší. Z těchto důvodů je využití tlakování trubek až do vzniku plastických deformací v místech s vysokou hladinou pnutí důležitou metodou ke snížení pnutí, která se využívá jak po dokončení výroby trub v hutním závodě, tak také po dokončení kompletace potrubí na trasách.

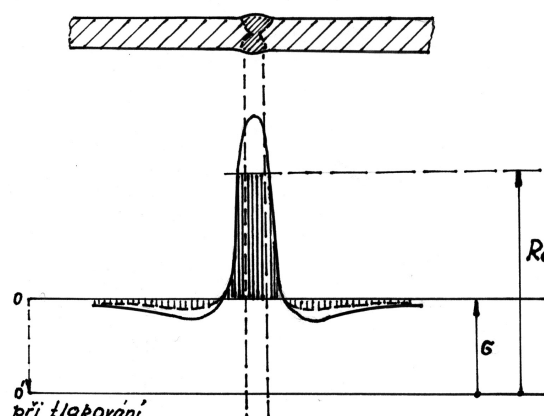
¹ Ing. Václav Linhart, CSc., SVÚM a.s., Podnikatelská 565, 190 11 Praha 9–Běchovice, tel.: +420 222724072, e-mail: strength@svum.cz

² Ing. Jana Sigmundová, SVÚM a.s., Podnikatelská 565, 190 11 Praha 9–Běchovice, tel.: +420 274023187, e-mail: sigmundova@svum.cz

Při tlakové zkoušce dochází ke skládání namáhání od tlaku a pnutí – obr. 1. Pokud v kritických místech překročí výsledné napětí mez kluzu materiálu, dojde v těchto místech k odbourání špiček napětí plasticou deformací a ke snížení pnutí, včetně jejich redistribuce.

2. Dodané trubky a uskutečněné práce

Chemické složení a základní mechanické vlastnosti trubek DN 500 dodaných do SVÚM a.s. jsou v tab. 1 a 2.



Obr. 1 Přestavba pnutí po vzniku plastické deformace při tlakování.

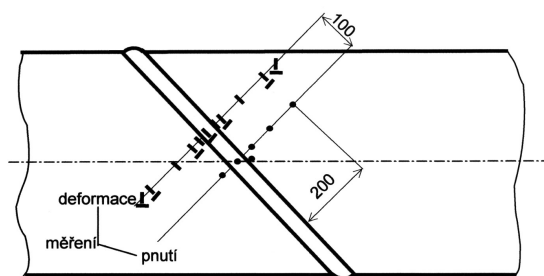
Ocel	% hm.									
	C	Si	Mn	S	P	Mo	Al	V	Nb	Ti
L450MB	0,12	0,19	1,44	0,014	0,012	0,089	0,044	0,075	0,045	0,039
L485MB	0,097	0,43	1,64	0,008	0,0027	0,079	0,05	0,057	0,055	0,049

Tab. 1 Chemické složení ocelí.

Ocel	Trubka DN	R _{p0,2} [MPa]	R _{t0,5} [MPa]	R _m [MPa]	R _{t0,5} /R _m [1]	A [%]	Z [%]	KV 0°C [J]
L450MB	500	454	455	591	0,77	25,14	61,76	158,7
L485MB	500	491,1	492,7	605	0,81	25,1	72,73	129,3

Tab. 2 Mechanické vlastnosti (tyče z trubek).

Trubky o délce 4 až 4,5 metrů byly do SVÚM a.s. dodány dle našeho požadavku ve stavu po dokončení výroby, tj. bez výstupního tlakování. Přivařením den se vytvořila zkušební potrubní tlaková tělesa DN 500. Na těchto tělesech se uskutečnilo postupné tlakování, tenzometrická měření deformací a měření pnutí. Tenzometrická měření a měření pnutí se uskutečnila ve středové části trubky po délce, na liniích kolmých ke šroubovicovému svaru – obr. 2. K měření pnutí byla zvolena odvrtávací metoda, popsaná ve směrnících [2 a 3]. Byly použity speciální tenzometrické růžice od firmy HBM typu 1–RY 61–1,5/120, a přípravek k tomuto účelu vyvinutý v SVÚM a.s. Měření a vyhodnocování pnutí se uskutečnilo v souladu s citovanými směrníci [2 a 3].



Obr. 2 Místa měření pnutí a deformací.

3. K tlakování potrubních těles

Při porovnávání výsledků dosažených při tlakování v hutích a při tlakování na uzavřených potrubních úsecích vč. pokusných potrubních tlakových tělesech je nutné přihlížet k určitým rozdílům v podmínkách namáhání v obou případech.

Tlakování trubek v podniku Mittal Steel Ostrava a.s. běžně probíhá při tlaku, který odpovídá hodnotě obvodového napětí $\sigma_{obv} = 0,95 R_e$. Tlak působí po dobu 45 s. Probíhá na zařízení s pohyblivým těsnicím pístem. Síla na trubce v podélném směru je velice nízká a odpovídá pasivním odporům v těsnění pístu. Přibližně platí, že $F_L \Rightarrow 0$. Plášť je pak namáhán prakticky jen obvodovým napětím σ_{obv} .

Při provádění stresstestů na uzavřených částech potrubí na trasách a také při zkouškách potrubních tlakových těles nelze zanedbat podélnou složku síly a odpovídající hodnotu napětí σ_L , která v těchto případech činí $\sigma_L = 0,5 \sigma_{obv}$.

Předpokladem pro snižování pnutí je vznik plastické deformace v kritických místech. Při tlakování s pohyblivým pístem platí pro vznik plastické deformace podmínka

$$\sigma_{obv} = R_e \quad (1)$$

Při tlakování tělesa s přivařenými dny lze podmínku pro vznik plastické deformace vyjádřit dle pevnostní hypotézy HMM vztahem

$$\sigma_v = \text{intenzita napětí} = \left(\sigma_{obv}^2 + \sigma_L^2 - \sigma_{obv} \sigma_L \right)^{1/2} = R_e (R_{t0,5}) \quad (2)$$

V případě, kdy při tlakování potrubního tělesa je hodnota $\sigma_{obv} = 0,95 R_e$ stejná jako v hutích, je hodnota σ_v (při $\sigma_L = 0,5 \sigma_{obv}$) podle (2)

$$\sigma_v = 0,866 \cdot 0,95 R_{t0,5} = 0,823 R_{t0,5} \quad (3)$$

V tomto případě úroveň kritické složky σ_v nižší než $0,95 R_e$ a k plastické deformaci dochází až při vyšších tlacích. K tomuto stavu je nutné přihlížet při hodnocení vlivu tlakování u potrubních těles vč. stresstestů na přestavbu pnutí.

4. Pnutí na netlakované trubce

Podle výsledky měření na dodané netlakované trubce mohou pnutí dosahovat až hodnotu meze kluzu. To je dobře patrné z výsledků měření na netlakované trubce z výroby z oceli L485MB – obr. 3.

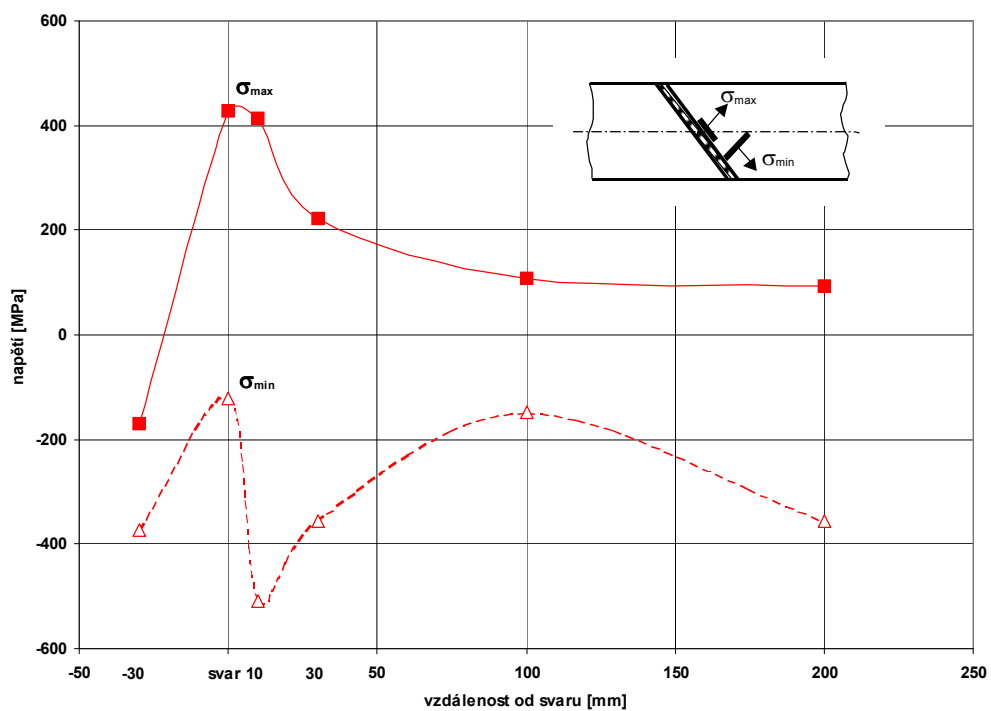
K orientaci pnutí je třeba uvést, že pnutí σ_{max} ve svaru a v jeho okolí působí podle výpočtového hodnocení kolmo na rovinu přibližně rovnoběžnou se svarem, σ_{min} pak kolmo na tuto rovinu – obr. 3.

5. Tlakování k mezi kluzu ($\sigma_v = R_e$)

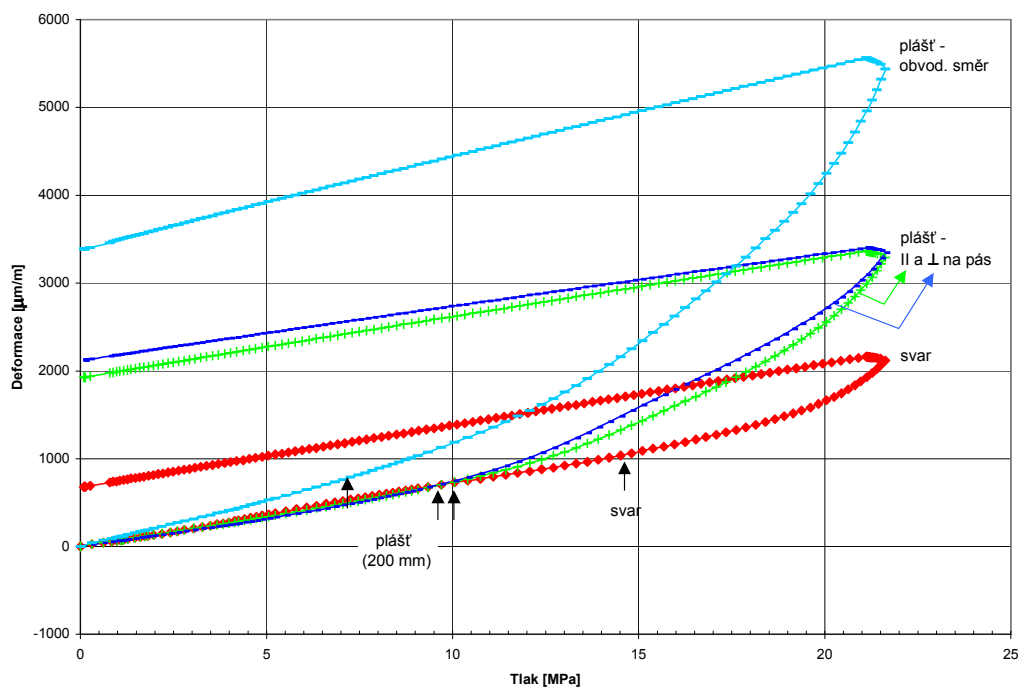
Některá potrubní tělesa DN 500 z oceli L450MB a L485MB byla tlakována k mezi kluzu, kdy $\sigma_v \sim (0,95 \text{ resp. } 0,96) R_{t0,5}$.

Příklad tenzometrických měření deformací ε v závislosti na tlaku p u dodané netlakované trubky DN 500 z oceli L485MB je na obr. 4. Průběh deformací $\varepsilon(p)$ nasvědčuje tomu, že hluboko pod max. hodnotou požadovaného tlaku, kdy $\sigma_v = 0,96 R_{t0,5}$, dochází ke vzniku prvních plastických deformací, na úrovních tlaků $(0,35 \text{ až } 0,7) p_{max}$, a to jak na plášti, tak ve svaru. Na plášti přitom dochází ke vzniku plastické deformace při nižší hodnotě než ve svaru – obr. 4. Výsledkem je částečné snížení špiček pnutí v těchto místech účinkem plastické deformace již při poměrně nízkém tlaku.

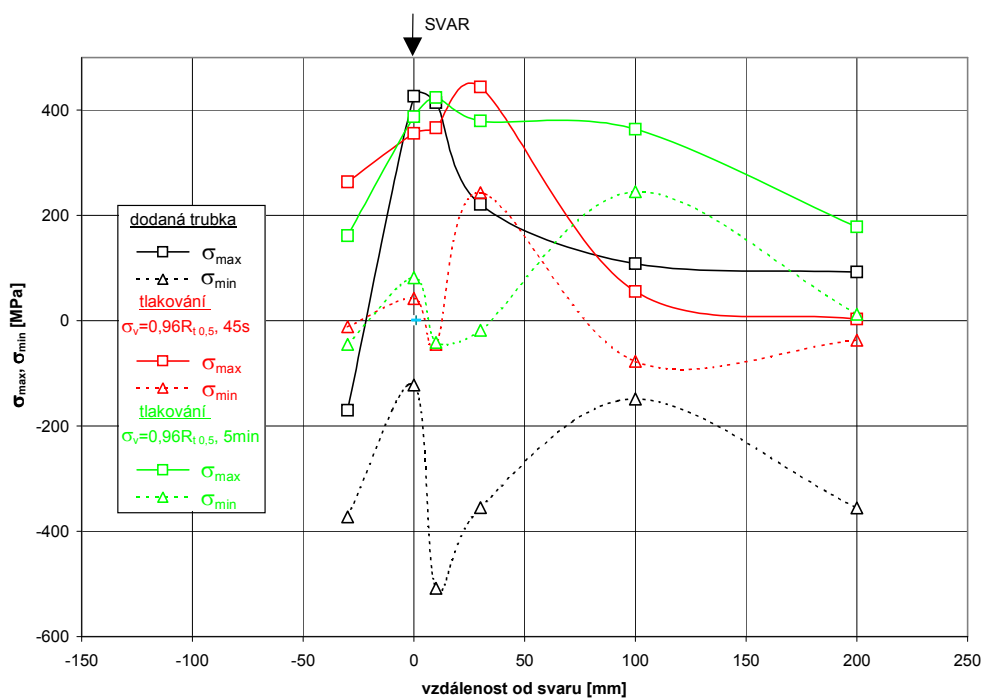
Výsledky měření pnutí po tlakování k mezi kluzu u trubky z oceli L485MB jsou na obr. 5, u trubky z oceli L450MB na obr. 6. Na obr. jsou porovnávána pnutí v dodané, netlakované trubce s trubkou tlakovanou na hodnotu odpovídající $\sigma_v = 0,96 R_{t0,5}$, kdy $\sigma_{obv} = 1,1 R_{t0,5}$.



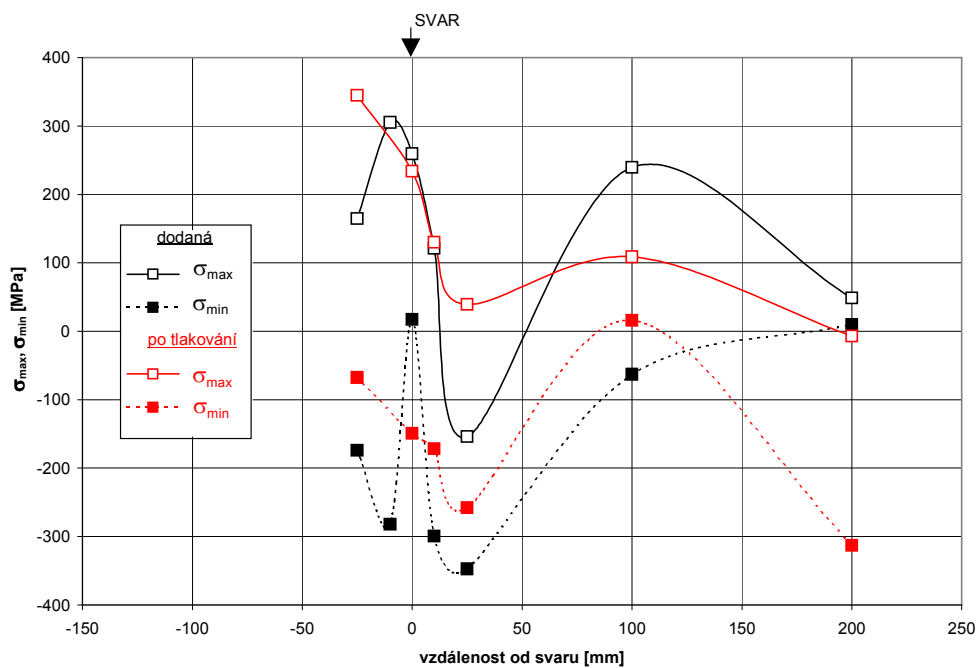
Obr. 3 Pnutí na dodané trubce z oceli L485MB.



Obr. 4 Tenzometrické měření deformací na trubce z oceli L485MB při tlakování do $\sigma_V = 0.96 R_{t0.5}$ ($p \sim 21.7$ MPa), 45 s.



Obr. 5 Pnutí na dodané trubce DN500 z oceli L485MB - v dodaném stavu a po tlakování $\sigma_v = 0,96 R_{t0,5}$, 45s a 5min.



Obr. 6 Pnutí na trubce DN 500 z oceli L450MB - v dodaném stavu a po tlakování na $\sigma = 0,823 R_{p0,2}$, $\sigma_{obv} = 0,95 R_{p0,2}$, 5 min.

Podle výsledků u trubky z oceli L485MB – obr. 5, tlakování při těchto podmínkách vedlo sice ke snížení úrovně složky pnutí $\sigma_{\min}$ v okolí svaru z hodnot -400 MPa, příp. -500 MPa na hodnoty $\sigma_{\min} \sim +100$ až $+200$ MPa, ale hodnoty $\sigma_{\max}$ ve svaru a jeho okolí se prakticky nezměnily – $\sigma_{\max} \sim 430$ MPa.

Obdobný výsledek mělo i tlakování trubky z oceli L450MB – obr. 6. I zde došlo při tlakování na $\sigma_{\text{obv}} = 0,95 R_{p0,2}$, tj. $\sigma_v = 0,823 R_{p0,2}$ k určitému snížení hodnot $\sigma_{\min}$ ve svaru a jeho okolí, ale hodnoty $\sigma_{\max}$ v těchto místech se opět prakticky nezměnily – $\sigma_{\max} \sim +300$ MPa.

Podle těchto výsledků dochází sice při tlakování k mezi kluzu při $\sigma_v \sim 0,96 R_{t0,5}$ ($\sigma_{\text{obv}} = 1,1 R_{t0,5}$) k určitému snížení pnutí, viz změny $\sigma_{\min}$, ale přihlédneme-li k malým změnám $\sigma_{\max}$, pak zbylá pnutí po tlakování nejsou zanedbatelná.

6. Tlakování do oblasti těsně nad mezí kluzu

Směrnice pro provádění napěťové zkoušky na vysokotlakém potrubí [1 a 5] připouští tlakování až na hodnotu $\sigma_{\text{obv}} = (1 \text{ až } 1,1) R_{t0,5}$, obvykle po dobu 1 hod. a to ve dvou stupních. Ve druhém stupni, který má zejména potvrdit zachování integrity potrubí se volí [1] tlak o 0,1 až 0,2 MPa nižší než ve stupni prvním. Z těchto důvodů není účinek tohoto druhého stupně tlakování pro úroveň pnutí rozhodující.

V našem programu jsme sledovali vliv napěťové zkoušky u trubek z oceli L485MB do oblasti $\sigma_v = (1,01 \text{ a } 1,05) R_{t0,5}$, kdy $\sigma_{\text{obv}} = (1,16 \text{ a } 1,21) R_{t0,5}$, a pak u trubky z oceli L450MB do hodnoty $\sigma_v = (0,87 \text{ a } 0,98) R_{t0,5}$, kdy $\sigma_{\text{obv}} = (1,05 \text{ až } 1,14) R_{t0,5}$.

Parametry napěťových zkoušek na trubce DN 500 z oceli L485MB:

- trubka v SVÚM a.s.: tlakování do $\sigma_v = 1,05 R_{t0,5}$, $p = 23,6$ MPa, 1 hod.
- trubka v CEPS a.s.¹:
 1. tlakování do $\sigma_v = 1,01 R_{t0,5}$, $p = 23,02$ MPa, 1 hod.
 2. tlakování do $\sigma_v = 0,92 R_{t0,5}$, $p = 22,9$ MPa, 30 min.

Výsledky měření pnutí jsou na obr. 7. V obr. je uvedeno pro porovnání i rozložení pnutí na dodané, netlakované trubce.

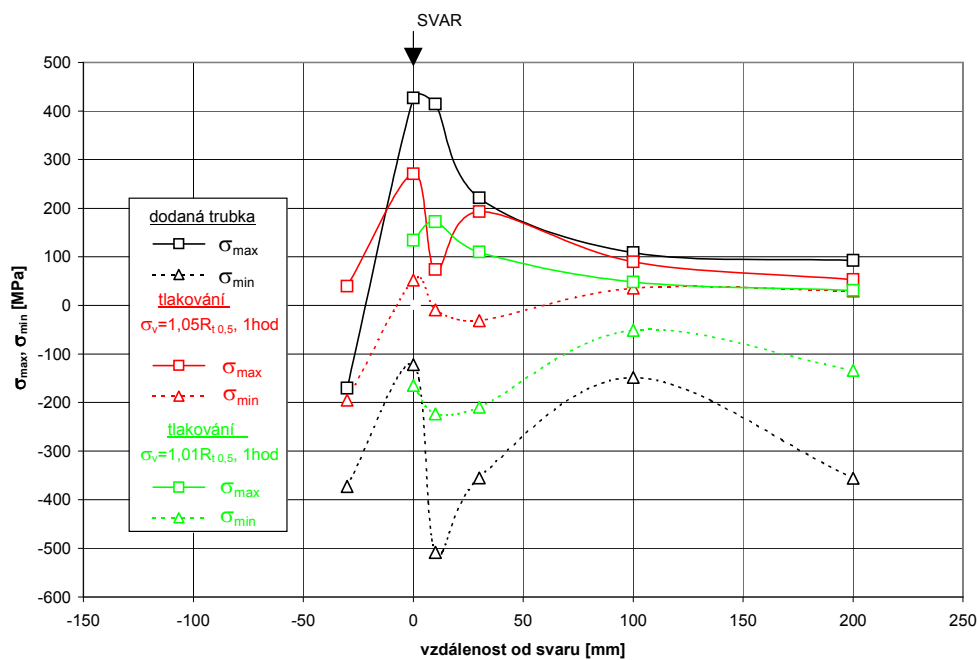
Z obr. 7 vyplývá, že tlakování těsně nad mez $R_{t0,5}$ (hodnota σ_v) vedlo v oblasti svaru a v jeho okolí k výraznému snížení úrovně obou složek pnutí $\sigma_{\max}$ i $\sigma_{\min}$ proti stavu na dodané, netlakované trubce. Hodnoty $\sigma_{\max}$ ve svaru a v jeho okolí se snížily z úrovně $+430$ MPa na 180 MPa až 270 MPa, hodnoty $\sigma_{\min}$ ve stejné oblasti z -510 MPa na -220 MPa, resp. -100 MPa. Také ve vzdálenějším místě od svaru (200 mm), na plášti došlo u obou složek pnutí k viditelnému poklesu hodnot.

Celkově je zřejmé, že zatímco úroveň pnutí na dodané netlakované trubce dosahuje až hodnot $+430$ MPa ($\sigma_{\max}$), resp. -510 MPa ($\sigma_{\min}$), pak po tlakování (po stresstestu) tímto způsobem je úroveň pnutí do 280 MPa ($\sigma_{\max}$), resp. -230 MPa ($\sigma_{\min}$), tudíž podstatně nižší.

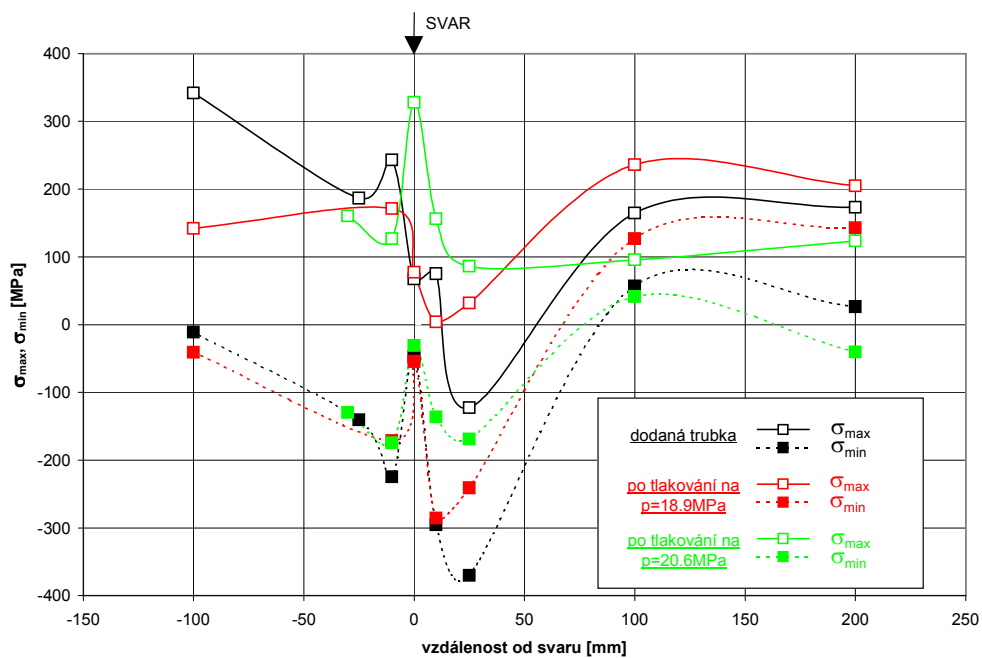
Při napěťových zkouškách na trubce DN 500 z oceli L450MB byly zvoleny dvě po sobě následující úrovně tlakování:

1. tlakování do $\sigma_v = 0,87 R_{p0,2}$, kdy $\sigma_{\text{obv}} = 1,05 R_{p0,2}$, $p = 18,9$ MPa, s prodlevou 5 min.
2. tlakování do $\sigma_v = 0,987 R_{p0,2}$, kdy $\sigma_{\text{obv}} = 1,14 R_{p0,2}$, $p = 20,6$ MPa, s prodlevou 5 min.

¹ uskutečněno v rámci spolupráce při řešení



Obr. 7 Pnutí na trubce DN 500 z oceli L485 - v dodaném stavu a po napěťových zkouškách.



Obr. 8 Pnutí na trubce DN 500 z oceli L450MB: dodaná trubka, trubka po tlakování na $p = 18,9\text{ MPa}$ ($\sigma_{\text{obv}} = 1,05 R_{p0,2}$) a po dalším tlakování na $p = 20,6\text{ MPa}$ ($\sigma_{\text{obv}} = 1,14 R_{p0,2}$).

Naměřená pnutí po prvním a po druhém tlakování jsou na obr. 8, společně s výsledkem měření na dodané, netlakované trubce.

Podle těchto výsledků se 1. tlakování projevilo snížením úrovně nejvyšších pnutí $\sigma_{\max}$ mimo svar (vzdálenost 100 mm) z +350 MPa na +150 MPa a nepatrným snížením $\sigma_{\max}$ těsněji při svaru, kde jsou však i základní naměřené hodnoty velice nízké, z +250 MPa na +180 MPa. U složky $\sigma_{\min}$ při svaru došlo ke snížení z -380 MPa na -290 MPa. Hodnota pnutí v oblasti mimo svar je u obou porovnávaných případů nízká.

Při 2. tlakování do $\sigma_v = 0,98 \text{ MPa}$, kdy $\sigma_{\text{obv}} = 1,14 R_{t0,5}$ nejsou změny proti předchozímu tlakování příliš výrazné – obr. 8. Určité snížení vykázaly jen hodnoty $\sigma_{\min}$ v okolí svaru. Vyšší hodnota pnutí $\sigma_{\max}$ ve svaru, +320 MPa, může souviset s proměnlivostí pnutí po obvodu trubky.

Při celkovém hodnocení je zřejmé, že na dodané netlakované trubce DN 500 z oceli L450MB dosahovala úroveň pnutí hodnot +350 MPa ($\sigma_{\max}$), až -380 MPa ($\sigma_{\min}$), pak po 1. tlakování je celková úroveň pnutí +240 MPa ($\sigma_{\max}$) až -250 MPa, event. -290 MPa ($\sigma_{\min}$). Při 2. tlakování je pak tato celková úroveň pnutí (+320 MPa), resp. 150 MPa ($\sigma_{\max}$) až -180 MPa ($\sigma_{\min}$).

7. Souhrn poznatků a závěr

V práci [4] byly získány poznatky o změnách pnutí v potrubních tlakových tělesech DN 500 z oceli L450MB při tlakování v okolí meze kluzu, a zejména do oblasti stresstestů. Měření pnutí se uskutečnilo odvtřávací metodou [2 a 3].

1. Tenzometrické měření deformací při tlakování potrubních těles do hodnoty $\sigma_v = 0,96 R_{t0,5}$ (tlak $p_{\max}$) prokázalo, že již při tlacích $p = (0,35 \text{ až } 0,7) p_{\max}$ dochází na plášti, ale také ve šroubovicovém svaru ke vzniku prvních plastických deformací – obr. 4. Projeví se nutně především snížením špičkových lokálních pnutí, a také poklesem hladiny pnutí.
2. Tlakování trubek z oceli L485MB na hodnoty $\sigma_v = (0,95 \text{ resp. } 0,96) R_{t0,5}$, s prodlevou 45 s, event. 5 min. vedlo k výraznému snížení složky pnutí $\sigma_{\min}$, z hodnoty -400 MPa až -500 MPa na +100 MPa až +200 MPa. Hodnoty pnutí v rovinách paralelních se svarem, se však významně nezměnily – $\sigma_{\max} \approx 430 \text{ MPa}$ – obr. 5. Prodloužení tlakové výdrže ze 45 s na 5 min nepřineslo významnější změny pnutí.
3. Obdobný výsledek byl získán i u trubky z oceli L450MB při tlakování na $\sigma_v = 0,823 R_{p0,2}$, kdy $\sigma_{\text{obv}} = 0,95 R_{p0,2}$, 5 min – obr. 6.
4. Tlakování trubek z oceli L485MB do oblasti těsně nad mezí kluzu, do oblasti stresstestů dalo tyto výsledky:
 - u trubek z oceli L485MB vedlo tlakování do $\sigma_v = 1,01 R_{t0,5}$ a $1,05 R_{t0,5}$, kdy $\sigma_{\text{obv}} = (1,16 \text{ až } 1,21) R_{t0,5}$, s prodlevou 1 hod, k výraznému celkovému snížení pnutí z původních hodnot +430 MPa ($\sigma_{\max}$) a -510 MPa ($\sigma_{\min}$) na +280 MPa ($\sigma_{\max}$), resp. -230 MPa ($\sigma_{\min}$) – obr. 7;
 - u trubky z oceli L450MB došlo při tlakování do $\sigma_v = 0,87 R_{p0,2}$, kdy $\sigma_{\text{obv}} = 1,05 R_{p0,2}$, s prodlevou 5 min, ke snížení pnutí $\sigma_{\max}$ z +350 MPa na +150 MPa, s nepatrným poklesem nízkých hodnot ve svaru z +250 MPa na +180 MPa. Hodnoty $\sigma_{\min}$ při svaru se snížily z -380 MPa na -290 MPa – obr. 8. Při následném tlakování do $\sigma_v = 0,987 R_{p0,2}$, kdy $\sigma_{\text{obv}} = 1,14 R_{p0,2}$ došlo v porovnání s předchozím stupněm jen ke snížení hodnoty $\sigma_{\min}$ v okolí svaru – obr. 8.

5. Souhrnné zhodnocení:

- Tlakování potrubní těles z ocelí L485MB a L450MB do hodnoty $\sigma_v = (0,95 \text{ až } 0,96) R_{t0,5}$ vedlo k významnému snížení části pnutí ($\sigma_{\min}$). Úroveň zbylých pnutí v trubce po tlakování není zanedbatelná.
- K výraznému celkovému snížení pnutí vedlo tlakování do oblasti $\sigma_v (1,01 \text{ až } 1,05) R_{t0,5}$, kdy $\sigma_{obv} = (1,16 \text{ až } 1,21) R_{t0,5}$.
- S přihlédnutím k čerpání přetvárné schopnosti oceli je při stresstestech vhodné omezit tlakování na hodnoty $\sigma_v = (1 \text{ až } 1,01) R_{t0,5}$, tj. $\sigma_{obv} = (1,15 \text{ až } 1,16) R_{t0,5}$, kdy je již snížení pnutí výrazné. Provádění stresstestů podle [1 a 5] do $\sigma_{obv} = (1 \text{ až } 1,1) R_e$ se pak podle dosažených výsledků nejeví jako optimální.

Poděkování: Práce vznikla při řešení projektu MPO FT-TA/091. Autoři děkují za umožnění publikace výsledků.

Literatura

- [1] „*Projektování a výstavba vvtl plynovodů s provedením napětové zkoušky.*“ TPG 701 01.
- [2] “*Standard test Method for Determining Residual Stress by the Hole Drilling Strain Gage Method*”. Standard ASTM E 837– 01, 2002.
- [3] “*Measurement of Residual Stress by the Hole Drilling Gage Method*”. Techn. Note TN-503–5 firmy Vishay, 1985.
- [4] V. Linhart, I. Černý, J. Sigmundová: Technické zprávy SVÚM a.s. k projektu FT-TA/091 č. 5300278 (r. 2005) a 5300278/I (r. 2006).
- [5] „*Plynovody a přípojky s nejvyšším provozním tlakem do 100 bar včetně.*“ Technická pravidla G702 04, ČPS Praha, 2006.