

RESIDUAL LIFE OF HIGH-PRESSURE PIPELINE DAMAGED BY SLOT ZBYTKOVÁ ŽIVOTNOST VYSOKOTLAKÉHO POTRUBÍ POŠKOZENÉHO DRÁŽKOU

Jira J., Jírová J., Němec J.

The paper deals with the experimental and theoretical analysis of the service residual life of a high-pressure pipeline DN 500 which is damaged by a longitudinal slot on the inner surface of the pipe wall. The longitudinal slot was located mainly in places of bends and had the diverse depth. Using the strain gauge measurement during the strength test enabled to describe the local process of deformation inside the slot and its vicinity. The attention was paid to the assessment of stress concentrations in the areas of these defects. The analysis of the influence of the longitudinal slot on the service residual life was also based on the fatigue strength, which was given by service intervals and pipe-line pulsation of internal pressure.

1. Popis vyšetřovaného problému a stanovení cíle výzkumu.

Úsek potrubí vysokotlakého (vtl) plynovodu DN 500 byl poškozen při jeho inspekci. Při protahování inspekčního zařízení lanem došlo v některých obloucích potrubí na vnitřní straně k vydrnění podélných drážek tažným lanem. Drážky měly hladký povrch s plynulými přechody ve směru podélné osy potrubí do základní stěny.

Vtl potrubí mělo vnější průměr $D=530$ mm se jmenovitou tloušťkou stěny $t=9,5$ mm a bylo podle atestu vyrobeno z materiálu ČSN 13126 o statické pevnosti $R_m=519$ MPa a mezi kluzu $R_s=352$ MPa, přičemž poměr $R_s/R_m=0,68$. Oblouky mají velký poloměr a byly provedeny ohýbáním za studena na ohýbacím stroji.

Hloubka drážek byla pracovníky plynárenského podniku proměřena na řadě míst, aby bylo možno nalézt místo s největším zeslabením stěny. Pro pevnostní zkoušku byl vybrán oblouk s největším zeslabením stěny drážkou. Před výrobou tlakové nádoby byl odříznutý kus vtl potrubí v délce 8,16 m geometricky proměřen a hloubka zeslabení v nejhlubším místě drážky byla zjištěna 4,75 mm. Protože zjištěná reálná tloušťka stěny trubky kolísala od 9,5 do 10 mm, jednalo se o reálné zeslabení stěny v nejhorším místě o 47,5% (50% nominální tloušťky stěny). Šířka drážky byla menší než 10 mm a měnila se podle hloubky poškození. Zároveň byly při proměřování skutečných geometrických rozměrů trubky nalezeny na vnitřní straně ohybu nepravidelnosti ve tvaru boulí, které měly charakter ploché sinusové vlny dlouhé 130 až 160 mm. Toto zvlnění vzniká při ohýbání trubek za studena a v uvedeném případě mělo rozhodující význam na hloubku drážky. Ostatní poškozená místa měla menší hloubku.

Byla prověřena struktura materiálu, jeho tvrdost v drážce a kvalita povrchové vrstvy a na základě teoretických úvah o rozsahu poškození bylo rozhodnuto:

- provést pevnostní zkoušku tlakové nádoby vyrobené z nejvíce poškozeného oblouku vnitřním přetlakem vodou,
- provést přitom tenzometrická měření rozvoje deformace v oblasti drážky s určením snížení meze plastických deformací,
- teoreticky zhodnotit mechanickou únavovou pevnost vtl trubky s nehlubší drážkou.

2. Pevnostní zkouška a tenzometrické měření.

Na odřezek oblouku byla navařena dna a hrdla pro tlakování a měření vnitřního tlaku. Na tlakové nádobě byla podle plánu rozmístění a hloubky drážky vybrána místa pro nalepení tenzometrů. Před vlastním nalepením tenzometrů byla očištěná místa prověřena ultrazvukovým tloušťkoměrem, aby tenzometry mohly být nalepeny přesně do dna drážky. Přesnost umístění tenzometrů byla zajištěna narýsovanými licovacími kříži. Pro tenzometrická měření byly použity odporové tenzometry firmy Mikrotechna ve dvou velikostech: SM 120 s měrnou délkou 4 mm a M 120 s měrnou délkou 9 mm.

Na tlakovou nádobu bylo nalepeno 8 kusů snímačů SM 120 a 1 kus M 120. Tenzometry byly nalepeny jako obvodové (T1, T3, T5, T7 a T9) a podélné (T2, T4, T6 a T8). Tenzometrické snímače T1 a T2 byly nalepeny na vnější stranu oblouku na neoslabenou stěnu tlakové nádoby, aby bylo možno sledovat rozvoj přetvoření při pevnostní tlakové zkoušce a tím bylo umožněno analyzovat deformační proces v místě drážky a bouli. Obvodový tenzometr T3 a podélný tenzometr T4 byly umístěny na vrchlik boule pro posouzení vyrovnávání této geometrické imperfekce během tlakové zkoušky. Tenzometry T5, T6, T7 a T8 byly nalepeny bezprostředně v místě největšího zeslabení drážkou ke sledování rozvoje přetvoření tohoto defektu během pevnostního testu. Jejich měrná velikost umožňovala analyzovat deformace přímo v nejslabším místě stěny. Obvodový snímač T9 (M 120) byl nalepen přes drážku, aby během tlakování zachytil deformační proces v oblasti ovlivněné drážkou. Rozmístění tenzometrů je možno vidět na obr. 1.

Součástí pevnostní zkoušky bylo, kromě analýzy lokálních přetvoření a zjištění pevnosti, sledovat proces zpevnění materiálu v místě drážky a proto zkouška probíhala ve 2 zatěžovacích cyklech. Druhý zatěžovací cyklus byl proveden až do roztržení tlakové nádoby.

I. zatěžovací cyklus (obr.2) byl proveden do velikosti vnitřního tlaku $P=12$ MPa což je 95% výpočtového vnitřního tlaku pro mez kluzu R_e (tj. $P_e=12,6$ MPa). Velikosti zvyšování vnitřního tlaku během zkoušky byly voleny vzhledem k pracovnímu režimu vtl potrubí při přepravě zemního plynu, tj. 6,3 MPa, aby mohla být posouzena spolehlivost potrubí v provozu. Od velikosti vnitřního tlaku $P=10$ MPa byla sledována možnost vytvoření plastických deformací a proto byly v tlakování přestávky pro ustálení rozvoje přetvoření pozorovaného na tenzometrech. Odlehčení v I. zatěžovacím cyklu bylo provedeno do tlaku $P=1,15$ MPa.

II. zatěžovací cyklus sloužil k pozorování zpevnění materiálu ve vybraných místech poškozeného oblouku drážkou a k určení velikosti destrukčního tlaku. K destrukci tlakového tělesa došlo při vnitřním tlaku $P=15$ MPa, což je 81% výpočtové pevnosti $P_m=18,6$ MPa, v místě 50% oslabení nominální tloušťky stěny drážkou. Destrukce se projevila smykovým lomením, který vznikl plastickým zeslabováním dna drážky v poslední fázi II. zatěžovacího cyklu. Před destrukcí se v této fázi z vnější strany stěny začaly v ní vytvářet v místech největšího oslabení drážkou mělké válcové podlouhlé propadlinky, které vizuálně signalizovaly proces plastizujícího procesu v místech s drážkou.

Obvodové tenzometry T5, T7 a T9 byly nalepeny na vnější povrch trubky do míst největšího zeslabení stěny drážkou, přičemž hloubka drážky se liší: (i) T5-h=4,75 mm, tj.47,5% skutečné tloušťky stěny, (ii) T7-h=3,2 mm, tj.39% stěny, (iii) T9-h=2,85 mm, tj.30% stěny. Za

základ vyhodnocení deformačního procesu v místě drážky jsme uvažovali zejména tenzometry T5, T6 a T9. Všechny snímače byly funkční do velikosti přetvoření 2,5%. Obvodový snímač T5 s kratší měrnou délkou vykazoval během zatěžovacího cyklu do tlaku $P=7$ MPa lokální ohybový efekt způsobený lokální redistribucí silového toku důsledkem excentrického oslabení stěny trubky podélnou válcovou drážkou, neboť v důsledku své délky měřil hodnoty přetvoření přímo ve dnu drážky. Obvodový tenzometr T9 s dvojnásobnou měrnou délkou již vliv tohoto úzce lokálního efektu neměřil.

Oba tenzometry T5 a T9 vykazují malou citlivost zeslabené oblasti s drážkou na namáhání vnitřním tlakem, neboť rozhodující část silového toku přejímají neoslabené oblasti stěny trubky. Svědčí o tom i sklon křivek jejich závislosti přetvoření na zatěžování vnitřním tlakem ve srovnání s průběhem přetvoření u obvodového tenzometru T1 umístěného na neoslabené stěně v dostatečné vzdálenosti od drážky. Z grafu lze usoudit, že vlivem dvousměrné napjatosti došlo u snímače T5 k dosažení meze kluzu R_e při tlaku $P=11,25$ MPa, což je 90% výpočtového tlaku pro dosažení R_e v neoslabené stěně trubky. U tenzometru T9 byla dosažena mez kluzu R_e při tlaku $P=10,75$ MPa, což je 85% výpočtového tlaku. Porovnáme-li velikosti tlaku k dosažení meze kluzu u obou tenzometrů umístěnými ve dnu drážky s výpočtovým tlakem a uvážíme-li, že rozdíl ve skutečném oslabení mezi místy obou snímačů je 17,5%, vidíme, že vliv oslabení stěny podélnou drážkou v pružné oblasti není tak významný vzhledem k přerozdělení silového toku ve stěně trubky.

Tenzometry T3 a T4 umístěnými v místě vrcholu vyboulení ukazují, že k vyrovnávání této geometrické imperfekce dochází již v počáteční fázi zatěžování, tj. od tlaku asi 4,5 MPa, kdy vlivem lokálního ohybového namáhání se u obvodového snímače T3 (obr.3) mění tahové napětí na tlakové. Tento stav je ukončen až po dosažení meze kluzu R_e v plné stěně trubky.

3. Zhodnocení únavové pevnosti.

Analýza vlivu drážky na zbytkovou životnost vtl potrubí byla založena na únavové pevnosti [1], která byla dána jednak přestávkami v provozu, jednak vlivem pulsace tlaku v potrubí (bylo předpokládáno $\pm 5\%$ změny tlaku, což odpovídá charakteru cyklu $R=0,85$). Výsledky rozboru vlastností materiálu v oblasti drážky ukázaly, že struktura je jemnozrnná, metalografický obraz nevykázal žádné trhlinky v kořeni drážky a ani zvýšenou tvrdost. Pro výchozí 1,5 násobnou koncentraci napětí je součinitel vrubového účinku udané tloušťky stěny a hladkého povrchu $\beta=1,35$ a pro střídavý cyklus byla určena příslušná Wöhlerova křivka. Pro opakovaně normální nebo pulsující namáhání je efekt vrubu nižší než u střídavého namáhání.

Pro rozkmit napětí, který byl počítán pro stěnu zeslabenou drážkou na ligament 5 mm a provozní tlak vtl potrubí $P=6,3$ MPa, platí:

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \sigma_h = \frac{1}{2} \cdot \frac{260}{5} \cdot 6,3 = 164 \text{ MPa}, \quad \text{pro } R=0 \rightarrow \sigma_m = \sigma_a,$$

Bylo uvažováno, že provozní přestávky by mohly být za dobu provozu vtl plynovodního potrubí 30 let nejvýše 10^3 a pulsace nejvýše 10^5 . Z analýzy vyplynula jednak velká rezerva k provozním hodnotám co do počtu změn a skutečnost, že by horní napětí muselo přestoupit teoretickou velikost napětí $\sigma=500$ MPa, aby došlo k rozvoji trhliny v kořeni drážky.

Posouzení bylo založeno na teoretickém ocenění únavového procesu. Z teorie lomové mechaniky v daném případě plyne, že rozhodující je iniciace trhliny oproti etapě šíření trhliny. Proto byla analýza založena na Wöhlerových křivkách, které odpovídají tomuto charakteru procesu poškozování tělesa. Z teorie lomové mechaniky plyne počet cyklů do iniciace trhliny podle vzorce:

$$\Delta N = c \cdot \left[\frac{\sigma_p^*}{k_{\sigma_{\max}} \cdot \sigma_a} \right]^{\frac{n^*+1}{n^*}}$$

- kde c je přibližně 1 pro cykly v oblasti střídavého namáhání
 σ_p^* je cyklická pevnost materiálu
 $k_{\sigma_{\max}}$ koncentrace napětí
 σ_a rozkmit
 n^* exponent cyklického zpevnění

Pro daný materiál, kde $n^*=0,2$, dostaneme výpočtem podle uvedeného vzorce pro počet provozních přestávek $\Delta N=4000$ cyklů. Obdobný výpočet byl proveden pro pulsaci tlaku.

4. Závěr.

Z tenzometrických měření vyplývá, že efekt podélné drážky ve stěně ohybu vtl plynovodního potrubí DN 500 na rozvoj plastické deformace není příliš významný. U obvodového tenzometru umístěného v drážce je dosažena mez kluzu R_e při reálném tlaku $P=11,25$ MPa. Integrální obvodový tenzometr T9 naměřil dosažení meze kluzu při velikosti vnitřního tlaku $P=10,75$ MPa. Je tomu proto tak, že lokálně omezená drážka nepředstavuje velkou koncentraci napětí s ohledem na její geometrii a hladký povrch a s ohledem na membránovou napjatost v neoslabené stěně trubky. Jestliže bychom uvážili neporušenou trubku, vyplývá z uvedených vlastností materiálu, že mez kluzu $R_e=352$ MPa by měla být dosažena při výpočtovém tlaku $P=12,6$ MPa, což potvrdil obvodový snímač T1. Pro drážku s půlkruhovým průřezem a s hloubkou do 1/2 tloušťky stěny dává teoretická koncentrace přetvoření v elastickém stavu hodnotu $k=1,5$. Zvýšené napětí ve dně drážky se na vývoji deformace prakticky neuplatňuje s ohledem na malou oblast přetvoření, kdy plná stěna trubky brání rozvoji plastické deformace. Při zvyšování tlaku tato koncentrace klesala a dosahovala při větších přetvořeních stěny a příslušném zpevnění materiálu největší hodnoty $k=1,23$, takže kritický tlak při roztržení tělesa v místě drážky pomalým tvárným porušením dosahuje teoretické hodnoty $P_m=15,2$ MPa, což souhlasí se skutečností. Trhlina se otevřela v místě největší hloubky drážky $h=4,75$ mm při reálném tlaku $P_m=15$ MPa. Trhlina vykazovala velké lokální plastické deformace, největší rozevření bylo 145 mm, její délka 1205 mm a okraje prokázaly smykové porušení a velké vyhnutí vně stěny trubky.

Posouzení na únavovou pevnost prokázalo dlouhou životnost ohybu DN 500 poškozeného drážkou, neboť 4000 cyklů reprezentuje pro např. předpokládaný počet 10 přestávek za rok teoretickou životnost 400 let. Ještě delší životnost, o řád vyšší, prokázal výpočet respektující pulsace tlaku.

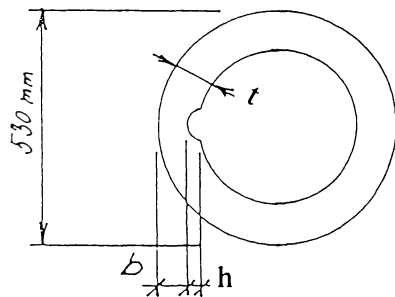
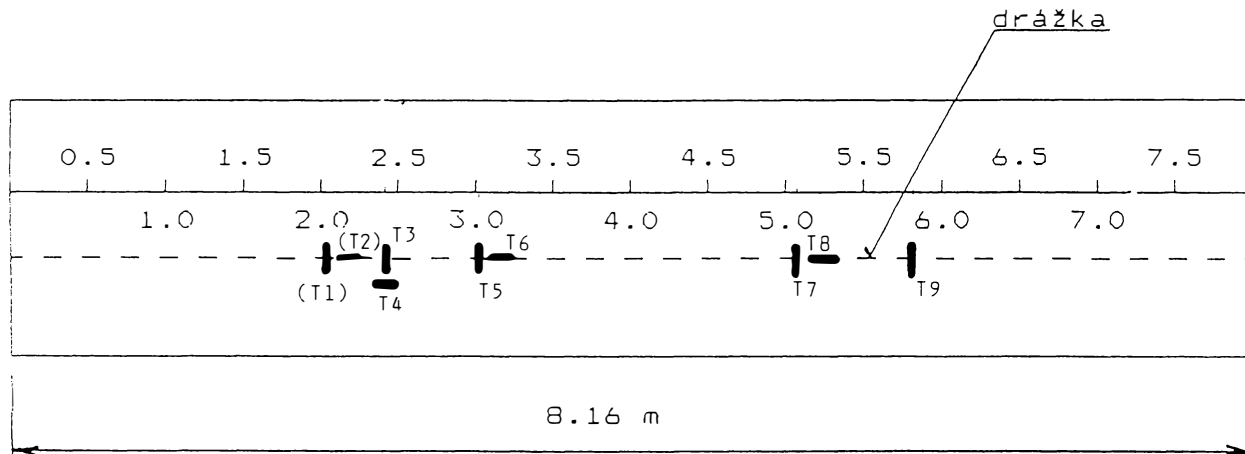
Posouzení životnosti ohybu DN 500 poškozeného drážkou prokazuje, že potrubí vtl plynovodu by bylo možno provozovat po dobu 30 let při max. provozním tlaku $P=6,3$ MPa, neboť součinitel bezpečnosti je podle ČSN 386410 $s=1,7>1,5$.

Literatura

- [1] J.Němec, O.Puchner: Tvarová pevnost kovových těles. Praha, SNTL 1971.
 [2] J.Jíra, J.Jírová, J.Němec, V.Beránková: Zpráva o výsledku tenzometrického měření a roztržení tělesa 530/9,5 mm. Výzkumná zpráva ÚTAM, Praha 1994.

SCHEMA ROZMÍSTĚNÍ TENZOMETRŮ

TRUBNÍ OBLOUK 530/9,5 MM S PODÉLNOU DRÁŽKOU

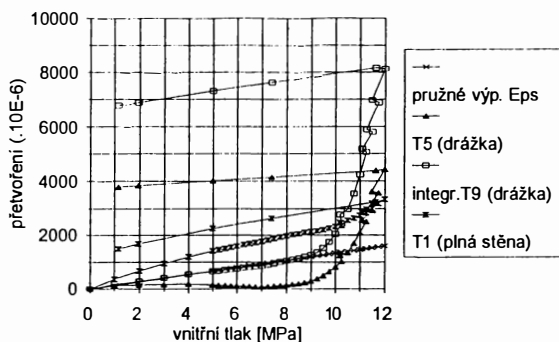


POZN.: (T1), (T2) na vnější straně oblouku

Obr. 1.

PŘETVOŘENÍ OBLOUKU 530/9,5 S DRÁŽKOU

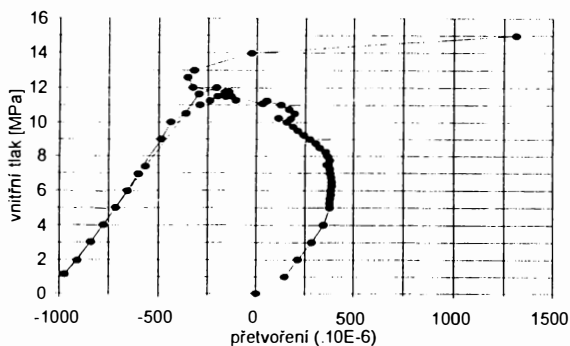
Porovnání s výpočtovým přetvořením Eps



Obr.2.

OBVODOVÝ TENZOMETR T3, VRCH BOULE

Oblouk 530/9,5 mm s podélnou drážkou



Obr.3.

Doc.Ing. Josef Jira, CSc., Ing. Jitka Jirová, CSc., Prof.Ing.Dr. Jaroslav Němec, DrSc.
Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Prosecká 74, 190 00 Praha 9,
telefon: 88 23 34, 88 25 80 FAX: 88 46 34