

## POSUDZOVANIE ZOSTATKOVEJ ŽIVOTNOSTI KOMPRESOROVÝCH STANÍC

### DETERMINATION OF RESIDUAL DURABILITY IN THE PIPING YARDS

František TREBUŇA, František ŠIMČÁK, Jozef BOCKO, Ingrid DELYOVÁ<sup>1</sup>

#### *Abstrakt*

Hodnotenie životnosti je v posledných rokoch a aj v súčasnosti predmetom intenzívneho výskumu. Cieľom príspevku je určenie zostatkovej životnosti potrubí potrubných dvorov.

**KLúčové slová:** zostatková životnosť, únava, spoľahlivosť, potrubné dvory.

#### *Abstract*

Lifetime assessment have been subject of intensive research in the past and it is topical since now. The calculation of residual life of pipes in the piping yards is the aim of contribution.

**Keywords:** Residual durability, Fatigue, Reliability, piping yards.

#### ÚVOD

Únava materiálu patrí medzi najčastejšie príčiny závažných havárií nosných konštrukcií napriek tomu, že tejto problematike sa vo svete venuje pozornosť už viac ako 150 rokov. Príčina tohoto stavu spočíva v zložitosti únavového procesu a množstve faktorov, ktoré ho ovplyvňujú. Článok uvádza postup posudzovania zostatkovej životnosti potrubných dvorov kompresorových staníc. Potrubné systémy v plynárskom priemysle je potrebné zodpovedne kontrolovať z hľadiska pevnostnej a životnostnej spoľahlivosti, pretože ich porušenie môže ohroziť ľudské životy, spôsobiť závažné ekologické katastrofy a veľké hospodárske škody. V každom potrubnom systéme dochádza počas prevádzky k časovo premenlivému zaťažovaniu, napr. pri odstavení, resp. uvedení systému do prevádzky, pri zmenách tlaku z prevádzkových príčin a pod., ktoré pri dlhodobom používaní potrubia a bez výmeny kritických úsekov zariadenia môže viesť k únavovému porušeniu materiálu a po vyčerpaní životnosti k pevnostnej poruche. Posúdenie únavovej životnosti kritického úseku už inštalovaného a prevádzkovaného potrubia je možné pri splnení základných predpokladov:

- je známy tvar vyšetřovaného úseku a rozmerové parametre potrubia,
- sú známe aktuálne mechanické vlastnosti materiálu,
- sú známe skutočné prevádzkové zaťaženia a výslednice vnútorných síl na koncoch uvažovaného úseku a história zaťažovania potrubia.

Dostatočne presné určenie týchto parametrov spôsobuje pri riešení často problémy, najväčšie však pri definovaní silových účinkov na potrubie (skutočný účinok tlaku, dilatčné sily ovplyvňované trením o uloženie, sily od „sadiania“ potrubia a s tým spojeného ohybu a krútenia, rozdiely oproti projekčným predpokladom, sily od tlaku a vlastnej tiaže v škrupinovej časti potrubia a i.).

---

<sup>1</sup> Dr.h.c. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc., prof. Ing. František ŠIMČÁK, CSc., doc. Ing. Jozef BOCKO, CSc., Ing. Ingrid DELYOVÁ, PhD., KAMaM, SJF TU v Košiciach, [frantisek.trebuna@tuke.sk](mailto:frantisek.trebuna@tuke.sk), [frantisek.simcak@tuke.sk](mailto:frantisek.simcak@tuke.sk), [jozef.bocko@tuke.sk](mailto:jozef.bocko@tuke.sk), [ingrid.delyova@tuke.sk](mailto:ingrid.delyova@tuke.sk)  
Lektoroval: doc. Ing. Jozef ČAČKO, Dr.Sc., UMaMS, SAV Bratislava

## POSUDZOVANIE ZOSTATKOVEJ ŽIVOTNOSTI

Na posúdenie zostatkovej životnosti bolo potrebné tenzometrické meranie. Z pomerných deformácií určených tenzometrickými snímačmi sa pri známom vnútornom pretlaku vypočítajú napätia v potrubí. Pri zohľadnení osového a ohybového namáhania, ako aj vnútorného tlaku sú určované extrémne hodnoty napätí, ako aj polohy extrémnych miest napätí. Z nameraných hodnôt pomerných deformácií možno, pri použití zavedených zjednodušujúcich predpokladov, oddeliť zložky od ohybu a osovej sily. Namerané hodnoty umožňujú určiť aj neutrálnu os pri ohybe, a pretože meranie je dynamické, možno určiť časové závislosti všetkých uvedených veličín.

Časové priebehy namáhania do úplného odtlakovania, resp. natlakovania potrubia dovoľujú stanoviť tie zložky osových napätí, ktoré so zreteľom na uloženie potrubí, trenie a odbočky nie je možné určiť analytickými alebo numerickými postupmi. Súčasne možno sledovať vplyv natáčania integrovaných vektorov vnútorných silových veličín na časový priebeh napätí. Časové priebehy prírastkov napätí od natlakovania poskytujú nevyhnutné údaje na určenie kumulácie únavového poškodenia, resp. umožňujú spolu s ďalšími vstupnými parametrami odpovedať na otázku, či je potrebné prvok, resp. konštrukciu posudzovať na únavu v zmysle platných noriem STN.

Ako už bolo spomenuté, potrubné dvory kompresorových staníc sú vystavené intenzívnemu dynamickému namáhaniu, vyvolávajúcemu kmitanie. Dynamické namáhanie spôsobuje postupnú kumuláciu poškodenia a znižuje zostatkovú životnosť potrubia.

Merania sa uskutočnili na dvoch kompresorových staniciach a to kompresorovej stanici č. 1 a kompresorovej stanici č. 2. Na sledovanom úseku potrubia potrubného dvora kompresorovej stanice č. 1 bolo potrubie uložené na pätkách s vibroizolačnými prvkami. Vibroizoláciou sa znižujú účinky dynamických vplyvov. Potrubia potrubného dvora kompresorovej stanice č. 2 boli uložené na pätkách bez vibroizolačných prvkov.

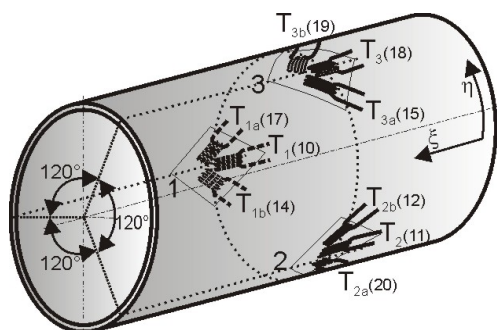
Materiálové charakteristiky potrubia oboch kompresorových staníc boli zistené meraním na vzorkách, pre ktoré boli určené nasledovné mechanické vlastnosti materiálu: Modul pružnosti  $E = 1,92 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ , Poissonovo číslo  $\mu = 0,3$ , medza klzu  $R_e = 393 \text{ MPa}$ , pevnosť  $R_m = 555 \text{ MPa}$ , ťažnosť  $A = 31,5\%$ , a kontrakcia  $\psi = 69\%$ .

Zvarový spoj z hľadiska štruktúry, priebehu tvrdosti, vrubovej húževnatosti a lámavosti za studena bolo možné považovať za vyhovujúci. Z hľadiska odolnosti voči krehkému porušeniu bol najslabším miestom zvarový kov a hrana stavenia.

Na obr.1 je schéma umiestnenia a označenia tenzometrických ružíc vo vyšetrovanom priereze potrubného dvora.

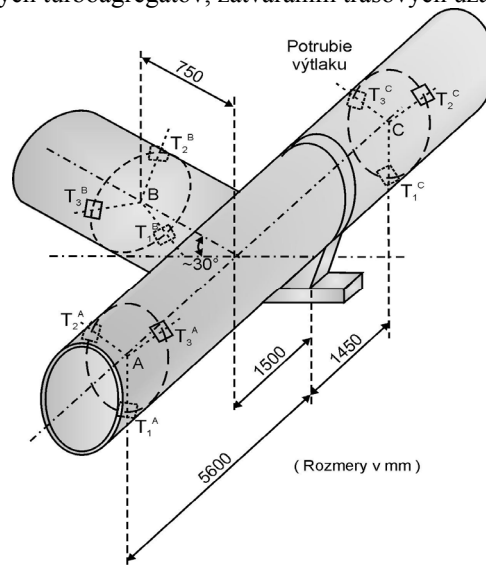
Merania na kompresorovej stanici č. 1 boli vykonané pri odtlakovaní potrubia medzitolaku, pri jeho natlakovaní a počas prevádzky. Ďalšie meranie sa realizovalo na potrubí výtlačku s odbočkou, pričom tri myslené rezy, v ktorých boli aplikované tenzometrické snímače, oddeľovali časť potrubia s pätkou obsahujúcou pružné vibroizolačné prvky.

Na obr.2 sú označené polohy myslených rezov *A*, *B*, *C* a v nich aplikovaných tenzometrických snímačov na potrubí výtlačku. Tenzometrické merania boli realizované pomocou



Obr.1 Umiestnenie tenzometrických ružíc s vyznačením vybraného elementu

tenzometrickej dynamickej aparatúry SPIDER 8 v rôznych časových úsekoch, počas ktorých boli realizované zmeny prevádzkových podmienok vo výtlačnom potrubí kompresorovej stanice štartom a vypínaním rôznych turboagregátov, zatváraním trasových uzáverov a pod.



Obr.2 Polohy myslenných rezov a v nich naaplikovaných tenzometrických snímačov na potrubí výtlačku

Pri posudzovaní zostatkovej životnosti potrubia potrubného dvora kompresorovej stanice č. 1 i kompresorovej stanice č. 2 podľa STN 73 1401 príloha K uvažujeme číslo detailu ČD = 302, kategória detailu KD = 125 ( $m = 3$ ). V zmysle uvedenej prílohy je týmto klasifikovaný tupý spoj zváraný z dvoch strán, zhotovený zváraním pod tavidlom. Podľa tabuľky uvedenej v norme STN 73 1401 pre uvedenú kategóriu detailu rozkmity napätí sú (obr. 3)

$$\Delta\sigma_{M,KD} = 232 \text{ MPa}, \quad \Delta\sigma = \Delta\tau = 92 \text{ MPa}, \quad \Delta\sigma_L = \Delta\tau_L = 51 \text{ MPa}.$$

Pre parciálny súčiniteľ spoľahlivosti únavového zaťažovania  $\gamma_{Ff}$  a parciálny súčiniteľ spoľahlivosti únavovej pevnosti  $\gamma_{Mf}$  uvažujeme  $\gamma_{Ff} = 1,0$ ,  $\gamma_{Mf} = 1,20$ .

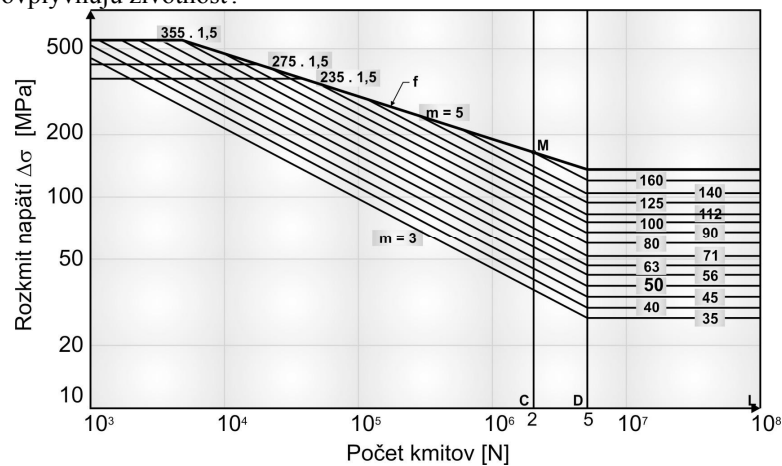
Vzhľadom na namáhanie pulzujúcim ťahom, resp. šmykom uvažujeme súčiniteľ nesúmernosti kmitu  $\varphi_r = 1,0$ . Keďže hrúbka steny potrubia je  $t < 25$  mm, pre súčiniteľ vplyvu hrúbky materiálu platí  $\varphi_t = 1,0$ .

Pri meraniach na kompresorovej stanici č. 2 [1] a tiež pri meraniach na kompresorovej stanici č. 1 [2] boli zistené hodnoty napätí, na základe ktorých boli urobené analýzy v zmysle STN 73 1401, kde je definované, či je potrebná kontrola na únavu alebo nie.

Meraním bolo zistené, že maximálne napätia v osovom smere pri natlakovaní potrubia výtlačku na 6 MPa je  $\sigma_{nom} = 51$  MPa. Napätie v obvodovom smere (nominálne) odpovedajúce danému tlaku bolo  $\sigma_t = 103$  MPa. Maximálne šmykové napätie pri tomto režime bolo  $\tau_{max} = 3$  MPa. Hlavné napätia sú  $\sigma_1 = 51$  MPa,  $\sigma_2 = 103$  MPa a redukované napätie nadobúda hodnotu  $\sigma_{red} = 1\sqrt{103^2 + 51^2} - 103 \cdot 51 = 89$  MPa.

K hodnote redukovaného napätia, ktorú považujeme za konštantnú so zreteľom na malý počet cyklov v priebehu života konštrukcie, je potrebné nasuperponovať hodnotu zvyškových

napätí, určených metódou odvrtávania. Odporúča sa pripočítavať len ťahové zložky, ktoré nepriaznivo ovplyvňujú životnosť.



Obr.3 Závislosť rozkmitu normálového napätia  $\Delta\sigma$  od počtu zaťažovacích kmitov  $N$  pre rôzne kategórie detailov

Pri prevádzke bolo namerané na kompresorovej stanici č. 1 maximálne normálové napätie v smere osi potrubia  $\Delta\sigma_v = 26$  MPa pri zvýšení tlaku o 0,7 MPa, čomu odpovedá hodnota napätia  $\Delta\sigma_{v \max} = 52$  MPa pri zvýšení tlaku na maximálnu hodnotu 7,45 MPa (t.j. nárast o 1,4 MPa). Odpovedajúca hodnota šmykového napätia je  $\Delta\tau_{\max} = 10$  MPa pri zohľadnení maximálneho natlakovania.

Pri zvýšení tlaku o  $\Delta p = 1,4$  MPa je nárast napätia v obvodovom smere  $\Delta\sigma_{t \max} = 24,5$  MPa. Prírastok hlavných napätí je

$$\Delta\sigma_{1,2} = \frac{\Delta\sigma_{v \max} + \Delta\sigma_{t \max}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta\sigma_{v \max} - \Delta\sigma_{t \max})^2 + 4 \cdot \Delta\tau_{\max}^2} =$$

$$= \frac{52 + 24,5}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(52 - 24,5)^2 + 4 \cdot 10^2},$$

$$\Delta\sigma_1 = 55 \text{ MPa},$$

$$\Delta\sigma_2 = 21 \text{ MPa}.$$

Prírastok redukovaného napätia

$$\Delta\sigma_r = \sqrt{\Delta\sigma_1^2 + \Delta\sigma_2^2 - \Delta\sigma_1 \Delta\sigma_2} = \sqrt{55^2 + 21^2 - 55 \cdot 21} = 48 \text{ MPa}.$$

Uvedená hodnota redukovaného napätia predstavuje rozkmit napätia  $\Delta\sigma$  v zmysle STN 73 1401.

Podľa STN 73 1401 sa pri výpočte na únavu neuvažujú rozkmity napätia, pre ktoré platí  $\Delta\sigma \cdot \gamma_{Ff} < \Delta\sigma_D \cdot \varphi$ . Pre náš prípad je

$$\Delta\sigma \cdot \gamma_{Ff} = 48 \cdot 1,0 < \Delta\sigma_D \cdot \frac{\varphi_r \cdot \varphi_t}{\gamma_{Mf}} = 92 \cdot \frac{1 \cdot 1}{1,2} = 76,6 \text{ MPa}.$$

Uvedená nerovnosť je splnená pre všetky rozkmity napätí pri spúšťaní kompresorov do prevádzky. Vzhľadom k uvedenému podľa STN 73 1401 by v potrubíach nemal nastať medzný stav únavy.

Prípád úplného odtlakovania a natlakovania potrubného systému neuvažujeme, pretože podľa údajov prevádzkovateľa sa vyskytuje ojedinele (cca 1x ročne).

Namerané výsledky z meraní potrubného systému kompresorovej stanice č. 2 sa rovnako spracovali ako v prípade výsledkov a kompresorovej stanici č. 1 a vyhodnotila sa zvyšková životnosť potrubného systému podľa normy STN 73 1401 posúdením na únavu. Tenzometrické meranie bolo vykonané v troch prierezoch potrubí - na saní, medzitolaku a výtlaku. Merací reťazec, pozostávajúci z hardvérového a softvérového vybavenia umožňuje priame vyhodnotenie napätí a ich analýzu. Na potrubnom systéme sa vykonalo 16 meraní. Na výtlaku boli namerané najvyššie hodnoty, preto sa pri výpočte vychádzalo práve z týchto hodnôt.

Počas merania sa tlak na medzitolaku ustálil na hodnote  $p = 5,83 \text{ MPa}$ , a tlak na výtlaku stúpala až po hodnotu  $p = 6,9 \text{ MPa}$ . Prírastok tlaku na výtlaku bol  $\Delta p = 1,07 \text{ MPa}$ . Pri prevádzke bolo namerané maximálne normálové napätie v smere osi potrubia  $\Delta\sigma_{v \max} = 82 \text{ MPa}$ , hodnota šmykového napätia bola  $\Delta\tau_{\max} = 22 \text{ MPa}$ . Napätie v obvodovom smere pri danom prírastku tlaku nadobudlo hodnotu  $\Delta\sigma_{t \max} = 19 \text{ MPa}$ .

Prírastok hlavných napätí je

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{1,2} &= \frac{\Delta\sigma_{v \max} + \Delta\sigma_{t \max}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta\sigma_{v \max} - \Delta\sigma_{t \max})^2 + 4 \cdot \Delta\tau_{\max}^2} = \\ &= \frac{82 + 19}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(82 - 19)^2 + 4 \cdot 22^2}, \end{aligned}$$

$$\Delta\sigma_1 = 89 \text{ MPa},$$

$$\Delta\sigma_2 = 12 \text{ MPa}.$$

Prírastok redukovaného napätia

$$\Delta\sigma_r = \sqrt{\Delta\sigma_1^2 + \Delta\sigma_2^2 - \Delta\sigma_1 \Delta\sigma_2} = \sqrt{89^2 + 12^2 - 89 \cdot 12} = 84 \text{ MPa}.$$

Uvedená hodnota redukovaného napätia predstavuje rozkmit napätia  $\Delta\sigma$  v zmysle STN 73 1401.

Ak  $\Delta\sigma_M \varphi > \Delta\sigma \gamma_{Ff} \geq \Delta\sigma_D \varphi$ , potom  $N = 2 \cdot 10^6 \left[ \Delta\sigma_C \varphi / (\Delta\sigma \gamma_{Ff}) \right]^3$ ,

Keďže zvarový spoj je rovnaký ako na potrubí kompresorovej stanici č. 1 takže podľa prílohy K normy je číslo detailu ČD = 302 a kategória detailu KD = 125 (m=3). Pre uvedenú kategóriu detailu rozkmit napätí sú  $\Delta\sigma_{M,KD} = 232 \text{ MPa}$ ,  $\Delta\sigma = \Delta\tau = 92 \text{ MPa}$ ,  $\Delta\sigma_L = \Delta\tau_L = 51 \text{ MPa}$ .

Po dosadení do podmienky

$$\Delta\sigma_M \varphi = 232 \cdot \frac{1 \cdot 1}{1,2} = 193,3 > \Delta\sigma \gamma_{Ff} = 84 \cdot 1,0 \geq \Delta\sigma_D \varphi = 92 \cdot \frac{1 \cdot 1}{1,2} = 76,6 \text{ MPa}.$$

Počet cyklov potom je

$$N = 2 \cdot 10^6 \left[ \Delta\sigma_C \varphi / (\Delta\sigma \gamma_{Ff}) \right]^3 = 2 \cdot 10^6 \left[ 125 \frac{1 \cdot 1}{1,2} / (84 \cdot 1,0) \right]^3 = 3,82 \cdot 10^6.$$

Keďže za 10 rokov bolo vykonaných  $0,6 \cdot 10^6$  až  $1 \cdot 10^6$  cyklov potom  $3,82 \cdot 10^6$  cyklov sa vykoná za 63,5 až 38,2 rokov.

## ZÁVER

Na základe rozboru statických i cyklických zaťažení a ich vplyvu na kumuláciu poškodenia možno konštatovať, že z hľadiska amplitúd zaťaženia i zo zreteľom na pulzáciu dvora, nie je uvedeným stavom v doterajšom rozsahu vyčerpaná životnosť zariadenia na kompresorovej stanici č.2. Tento faktor neovplyvňuje ukončenie života zariadenia. Podľa normy STN 73 1401 pre namáhanie konštrukčného detailu normálovými napätiami s konštantným rozkmitom sa únavová životnosť vypočítala v počte cyklov do lomu, podľa toho sa určila predpokladaná doba života najviac namáhaného miesta.

V posúdení zostatkovej životnosti vykonanej podľa normy pri zohľadnení parciálnych súčiniteľov spoľahlivosti i so zreteľom na hľadiská kontroly dôsledkov únavového porušenia možno na základe analýzy relatívne obmedzeného rozsahu meraní na kompresorovej stanici č. 1 konštatovať, že po úprave uloženia nie je nutné vykonávať kontrolu na únavu, nakoľko rozkmity napätí nedosahujú hodnotu prípustných rozkmitov.

Záverom je treba poznamenať, že z porovnania maximálnych normálových napätí nameraných pri spúšťaní kompresorovej stanice č. 2 ( $\Delta\sigma_{\max} = 82$  MPa - potrubie bez vibroizolačných prvkov) a kompresorovej stanici č. 1 ( $\Delta\sigma_{\max} = 52$  MPa - potrubie s vibroizolačnými prvkami) došlo k poklesu maximálnych napätí o cca 40 %, čo jednoznačne potvrdzuje zníženie dynamického namáhania a zvýšenie zostatkovej životnosti potrubia aj vplyvom pružného uloženia pätiiek potrubia.

Autori ďakujú Vedeckej grantovej agentúre MŠ SR za podporu v rámci riešenia projektov č.1/2187/05 a č.1/1073/04.

## LITERATÚRA

- [1] TREBUŇA, F. a kol.: *Určenie zostatkovej životnosti potrubného dvora prvej haly kompresorovej stanice vo Veľkých Kapušanoch*. Výskumná správa SjF TU v Košiciach, 1999
- [2] TREBUŇA, F. a kol.: *Určenie zvyškovej životnosti potrubných dvorov II. Etapa. Prieběžná správa*, Výskumná správa, SjF TU v Košiciach, 2003
- [3] DELYOVÁ, I.: *Uplatnenie prostriedkov EAN pri určovaní životnosti nosných prvkov a konštrukcií*. Dizertačná práca, október 2005
- [4] STN 73 1401-1998: *Navrhovanie ocelových konštrukcií*. Bratislava, Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR
- [5] JUHAS, P. a kol: *Navrhovanie ocelových konštrukcií*. Komentár k STN 73 1401: 1998
- [6] VAVRO, J., KOPECKÝ, M., SÁGA, M., FANDÁKOVÁ, M.: *Nové prostriedky a metódy riešenia sústav telies II*, Digital Graphic, Trenčín, 2004
- [7] SÁGA, M.: *Príspevok k pevnostnému dimenzovaniu tenkostenných rámov*, zborník pracovného seminára "SETRAS" 97, Žilina, 1997
- [8] HRIVŇÁK, I., ELESZTÓS, O., BENČA, Š., PODEBRADSKÝ, J.: *Hodnotenie spôsobilosti a bezpečnosti zvarovaných tlakových nádob v chemickom priemysle*. Zváranie – Svařování, 3-4/2001