

OPRAVA POTRUBÍ POMOCOU PRIVARENÝCH ZÁPLAT - NUMERICKÁ A EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA

PIPE REPAIR USING WELDED PATCHES - NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS

Ladislav ÉCSI, Pavel ÉLESZTÓS¹, Ivan HAMÁK²

Abstrakt

Z ekonomického hľadiska oprava plynárenských potrubí pomocou privarených záplat má veľký význam a navyše je možné ju použiť aj v situáciách, kde lokálny úbytok hrúbky steny presahuje 80%. Cieľom tejto práce je prispieť k oprávnenosti použitia tejto technológie opravy a poukázať na jej prínos ako aj na prípadné nedostatky a to hlavne z pohľadu bezpečnosti a spoľahlivosti prevádzky. K dosiahnutiu uvedených cieľov sme si zvolili numerické a experimentálne štúdium opraveného kusu potrubia pomocou privarených záplat zaťažené vnútorným cyklickým pretlakom. V štúdiu, ktorého výsledky stručne prezentujeme, boli použité rúry rôzneho menovitého priemeru a záplaty rôznych tvarov.

Kľúčové slová: oprava potrubí pomocou privarených záplat, experimentálne a numerické štúdium.

Abstract

From the economical point of view a gas pipeline repair using welded patches is of great importance and moreover can be applied in situations, where due to corrosion, the pipe wall thickness has been reduced by up to 80%. The aim of this work is to attempt to justify the usage of such a repair technology, to point out its advantages and disadvantages mainly with respect to the pipeline safety and operation reliability. To achieve these goals, a numerical and experimental study has been carried out on a repaired piece of pipe using welded patches, which was loaded with cyclic inner pressure. In the study, the results of which are presented, were used different nominal diameter pipes and various patch shapes.

Keywords: pipe repair using welded patches, experimental and numerical study.

ÚVOD

Z ekonomického hľadiska oprava plynárenských potrubí pomocou privarených záplat má veľký význam. V odbornej literatúre táto problematika nie je spracovaná v dostatočnej šírke, vo všeobecnosti názory na oprávnenosť takejto opravy rozchádzajú a chýba tiež normový postup. Dôvod spočíva v zložitosti technológie opravy, keďže treba dodržať požadovaný technologický postup často v terénnych podmienkach. Obmedzenia metódy sú také isté ako pre iné opravy zvarov, tj. zvariteľnosť materiálu rúr, zostávajúca hrúbka steny a potreba vysoko kvalifikovaného zvarača na vykonanie opravy. Táto metóda je však zaujímavá vzhľadom k nízkym nákladom pri jej realizácii a možnosti jej použitia v situáciách kde lokálny úbytok hrúbky steny presahuje 80 %. Cieľom tejto práce bolo prispieť k oprávnenosti použitia tejto technológie opravy a poukázať na

¹ Ing. Ladislav ÉCSI, PhD., doc. Ing. Pavel ÉLESZTÓS, CSc., KTM Sjf STU Bratislava, ladislav.ecsi@stuba.sk, pavel.elesztos@stuba.sk,

² Ing. HAMÁK Ivan, VÚZ Bratislava, hamaki@vuz.sk

Lektoroval: Dr.h.c. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc., KAMaM, Sjf TU v Košiciach, frantisek.trebuna@tuke.sk

jej prínos resp. na prípadné nedostatky, a to hlavne z pohľadu bezpečnosti a spoľahlivosti prevádzky. K dosiahnutiu uvedených cieľov sme si zvolili numerické a experimentálne štúdium opraveného kusu potrubia pomocou privarených záplat zaťaženého vnútorným cyklickým pretlakom. V štúdiu, ktorého výsledky stručne prezentujeme, boli použité rúry rôzneho menovitého priemeru a záplaty rôznych tvarov.

OPIS EXPERIMENTÁLNYCH, NUMERICKÝCH METÓD A POUŽITÉHO MATERIÁLU

Modelová skúška hydrostatickým tlakom rúry DN 500 x 8 / DN 300 x 8 s defektami typu „*jamkovej korózie opravenými pomocou záplat*“ boli defekty na rúre imitované vyvrtaním skupiny dier do hĺbky $6,5 \div 7$ mm, čo predstavuje viac ako 80% z hrúbky steny. Konfigurácia dier (stredovej diery a obvodových centrických dier) sa pre jednotlivé rozsahy poškodenia rúry nachádzala na ploche kruhu s priemerom $\varnothing 13$, $\varnothing 40$ resp. $\varnothing 60$ mm.

Záplaty hrúbky 10 mm (t.j. 1,25-násobok hrúbky steny opravovanej rúry) boli odobraté z plynovodnej rúry nablížšieho väčšieho priemeru rezaním kyslíko-acetylenovým plameňom s následným obrúsením prídavkov. Boli skúmané záplaty:

- *štvorcová* (obdĺžniková 200 x 205 mm), vzniklá prienikom rúry na záplaty a štvorbokého hranola so stranami 200 mm,
- *štvorcová so zaoblenými rohmi* s polomerom 50 mm,
- *kruhovú* (eliptickú s poloosami 100 a 102,5 mm), vzniklá prienikom rúry, z ktorej sa záplaty odobrali a valca s $\varnothing 200$ mm.

Záplaty boli na opravovanú rúru privarené kútovými zvarmi v stave, keď rúra bola pod vnútorným pretlakom 3 MPa. Na povrch záplaty v okolí jej stredu boli nalepené jednoosové tenzometre 6/120 LY11, orientované v osovom resp. tangenciálnom (obvodovom) smere rúry T3os a T4tan a tiež na povrch rúry v blízkosti kútových zvarov záplaty boli pripevnené tenzometre T1tan a T2os a to v miestach určenými s priečnym a pozdĺžnym rezom rúry, vedenými cez stred záplaty.

Pri skúške s hydrostatickým tlakom sa rúra so záplatami zaťažovala nasledovne:

- na tlak 6,5 MPa s návratom do východiskového stavu 0 MPa s priebežným meraním deformácie v miestach tenzometrov, tento cyklus sa 3 – krát opakoval.
- na tlak 6,5 MPa s návratom do východiskového stavu 0 MPa pri prieniku tlaku pod záplatu, ktorý sa realizoval prevrtaním záplaty a steny rúry pod záplatu (v strede záplaty) a následným zaslepením otvoru v záplate skrutkou M8. Tento cyklus sa 2 – krát opakoval.
- cyklickým zaťažovaním vnútorným pretlakom v intervale 0,5 - 6,5 MPa s počtom cyklov 2000 (pri prieniku tlaku pod záplatu).
- hydrostatickým tlakom do porušenia (pri prieniku tlaku pod záplatu).

Výpočet napäťovo-deformačného stavu rúry s defektami jamkovej korózie, opravenými pomocou záplat, bol vykonaný numericky pomocou metódy konečných prvkov s použitím programu ANSYS 7.0. Pri tvorbe výpočtového modelu rúry, záplaty, ako aj kútového zvaru bol použitý 8 uzlový prvok SOLID 45, s opisom pomocou veľkých pretvorení s plnou numerickou integráciou a so špeciálnymi tvarovými funkciami. Vo výpočte sa používal multilineárny materiálový model s izotropným spevňovaním, stanovený z príslušných ťahových diagramov materiálu rúry, záplaty a zvaru. Geometrický model bol vytvorený tak, aby medzi vonkajším povrchom rúry a vnútorným povrchom záplaty (v stave bez zaťaženia) bola konštantná medzera 0,5 mm. Kontakt medzi vnútorným povrchom záplaty a vonkajším povrchom rúry pod ňou bol uvažovaný použitím kontaktných prvkov CONTACT 173 a TARGET 170, ktoré sa zakladajú na zmiešanej formulácii na báze penalty-koeficientu a Lagrangeovho multiplikátora s detekciou

kontaktu v Gaussovom bode. Jamková korózia rúry bola na modeli realizovaná súvislým zoslabením steny na 20% pôvodnej hodnoty na ploche kruhu, zhodného s kruhom, opísaným konfigurácií slepých dier pri imitácii poškodenia rúry na experimentálnom modeli.

Výpočet bol realizovaný iba na určenie pevnosti potrubia ako statický, postupným zaťažovaním po časových krokoch, pričom ako kritérium na jeho ukončenie bolo zvolené strata stability systému, t.j. singularita globálnej matice tuhosti.

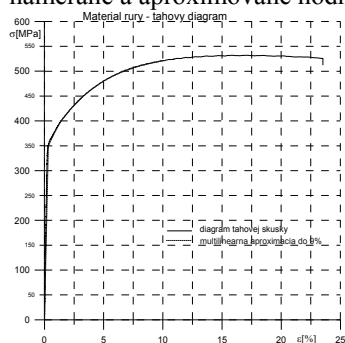
Skutočnosť, že pri tvorbe experimentálneho modelu bola záplata privarená na zaťažujúcu rúru s pretlakom 3 MPa (pri tejto hodnote tlaku je záplata v nezaťažovanom stave) a teda po odľahčení tlaku vznikol v záplate a rúre odpovedajúci systém zvyškových napätí, bola vo výpočtovom modeli realizovaná predpätím vo forme počiatočného termálneho pretvorenia s rôznymi koeficientmi teplotnej rozťažnosti v obvodovom a osovom smere tak, aby privarená záplata na rúre s pretlakom 3 MPa bola približne v stave bez napätí.

Ťahové skúšky materiálu rúry, materiálu zvaru a záplaty, ako vstupov do výpočtu, boli vykonané v laboratóriách Katedry pružnosti a pevnosti na elektrohydraulickom pulzátore EDYZ 6 riadenom počítačom. Rýchlosť zaťažovania bola 14 kN/sek. Presnosť zabudovaného snímača sily PS MO1 je 0,2 % a snímača predĺženia (extenzometra) 0,3 %. Triedy presnosti odpovedajú ASTM E4-89. Priebeh skúšok a ich vyhodnotenie odpovedá STN EN 10002-1 a výsledky merania medze klzu a medze pevnosti uvádzame v tabuľke 1:

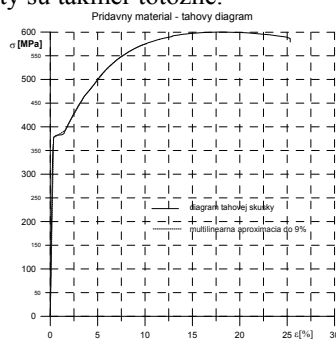
Pevnostné vlastnosti použitých materiálov- priemerné hodnoty **Tabuľka 1**

Materiál	Medza klzu σ_{kt} [MPa]	Medza pevnosti σ_{pt} [MPa]
rúra	355	531
prídavný materiál	390	600
záplata	375	586

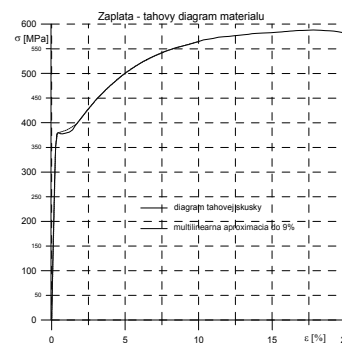
Pre pružne-plastický výpočet privarenej záplaty na koróziou poškodené potrubie je potrebné zadať deformačné krivky jednotlivých materiálov. Programový systém ANSYS umožňuje počítať s veľmi presným modelom – tzv. multilineárnym modelom – materiálu, ktorý sa získa zo skutočného ťahového diagramu jeho aproximáciou krátkymi lineárnymi úsekmi. Aproximáciu sme ukončili pri pomernej deformácii o veľkosti 9%, čo je stav materiálu tesne pred začiatkom vytvárania krčku pri plastizácii na medzi pevnosti materiálu. Tento deformačný stav materiálu je v našich výpočtových modeloch považovaný za hraničný pre jeho deštrukciu. Presnosť tejto aproximácie je dokumentovaná v nižšie uvedených ťahových diagramoch, kde namerané a aproximované hodnoty sú takmer totožné.



Obr.1 Materiál rúry



Obr.2 Prídavný materiál



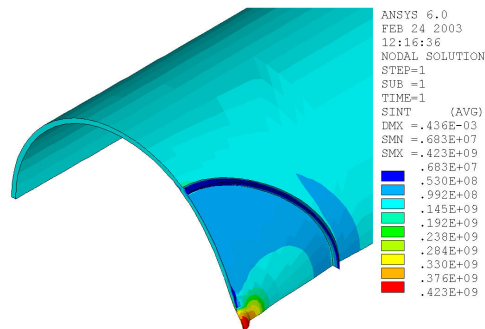
Obr.3 Materiál záplaty

VÝSLEDKY A DISKUSIA DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

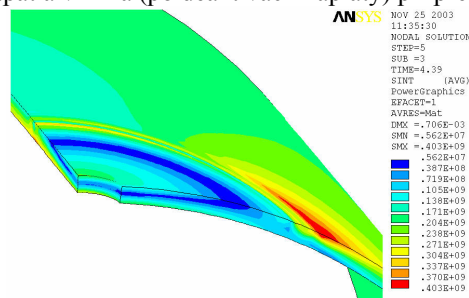
Vo všetkých výpočtoch sme využili dve roviny symetrie, zadané príslušnými okrajovými podmienkami. Nelineárnu deformačno-napätovú analýzu sme realizovali pre rôzne veľkosti

koróziou poškodennej plochy a pre tri tvary záplat, kruhovú, obdĺžnikovú a obdĺžnikovú so zaoblenými rohmi. V ďalšom uvedieme len niektoré vybrané výsledky týchto výpočtov [1].

Na obr.4 a obr.5 sme znázornili rozloženie intenzity napätia (pre prípad kruhovej záplaty) pri prevádzkovom tlaku na rúre DN 500 s koróznym úbytkom steny potrubia (80 % pôvodnej hrúbky), pričom priemer imitovaného úbytku bol $\varnothing 30$ mm.



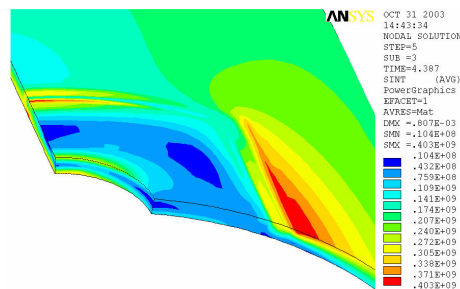
Obr.4 Mapa intenzity napätia v MPa (po deaktivácii záplaty) pri prevádzkovom tlaku 6.5 MPa



Obr.5 Mapa intenzity napätia v $[N/m^2]$ na vonkajšom povrchu rúry v mieste kruhovej záplaty pri zaťažení opravenej rúry (s poškodením na ploche $\varnothing 30$ mm) pretlakom 6,5 MPa pri prieniku tlaku pod záplatu

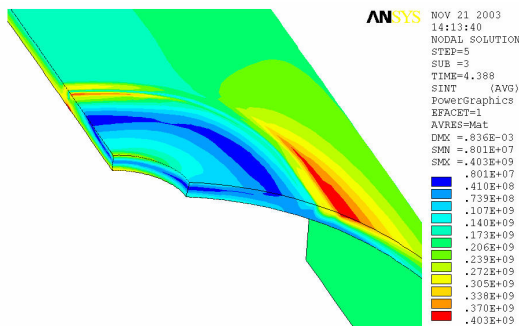
Na obr.6 sme znázornili rozloženie intenzity napätia na rúre v mieste obdĺžnikovej záplaty opravenej rúry s poškodením na ploche $\varnothing 60$ mm a zaťažení pretlakom 6,5 MPa pri prieniku tlaku pod záplatu.

Obr.7 znázorňuje mapu intenzity napätia na rúre v mieste záplaty so zaoblenými rohmi pri zaťažení opravenej rúry (s poškodením na ploche $\varnothing 40$ mm) pretlakom 6,2 MPa pri prieniku tlaku pod záplatu.



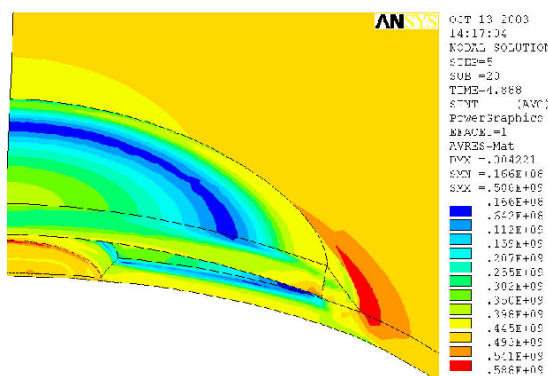
Obr. 6 Mapa intenzity napätia v $[N/m^2]$ na rúre v mieste obdĺžnikovej záplaty pri zaťažení opravenej rúry (s poškodením na ploche $\varnothing 60$ mm) pretlakom 6,5 MPa pri prieniku tlaku pod záplatu

Pre zobrazenie napätí na poškodenej rúre pod záplatou sme záplatu odstránili, vo výpočtoch sme však jeho účinok uvažovali. Výsledky analýzy ukazujú, že dokiaľ nenastane perforácia potrubia privarená záplata významne neovplyvňuje deformačno-napät'ový stav lokality opraveného miesta.



Obr.7 Mapa intenzity napätia v [N/m²] na rúre v mieste záplaty so zaoblenými rohmi pri zaťažení opravenej rúry (s poškodením na ploche ϕ 40mm) pretlakom 6,2 MPa pri prieniku tlaku pod záplatu

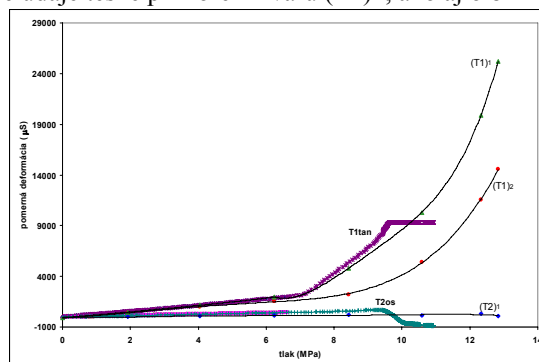
Na obr.8 je znázornené rozloženie intenzity napätia na rúre v mieste kruhovej záplaty opravenej rúry s poškodením na ploche ϕ 60 mm a zaťažení pretlakom 14,2 MPa pri prieniku tlaku pod záplatu. Pri tejto hodnote pretlaku výpočet prestal konvergovať pretože v oblasti prípustných napätí určenej plochou plasticity v statickom výpočte už nie je možné dosiahnuť rovnováhu medzi vektorom vonkajších síl, vyvolaným vnútorným pretlakom a vektorom vnútorných síl, určeným tenzorom napätí. Navyiac, v kritických miestach hodnota kumulovanej plastickej deformácie presahuje 9%. Pri tejto hodnote plastickeho pretvorenia pri ťahovej skúške na vzorke sa začína vytvárať krčok, ktorý vyvolá koncentráciu napätí a výrazne narúša predpoklad jednoosovej napätosti. Vďaka tomuto javu ťahovú skúšku nie je možné považovať za presnú nad hodnotou 9% plastickeho pretvorenia a preto aj výpočítané hodnoty nad touto hodnotou kumulovaného plastickeho pretvorenia môžeme považovať iba za informatívne.



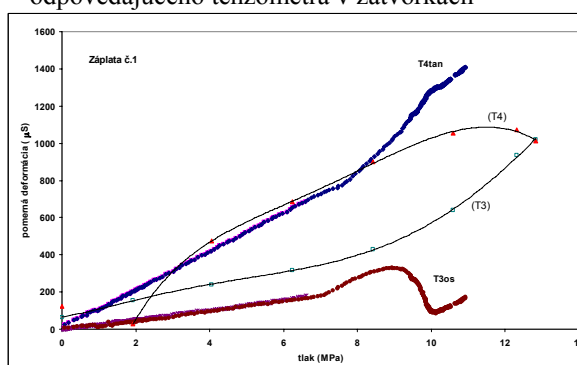
Obr.8 Mapa intenzity napätia v [N/m²] na rúre v mieste kruhovej záplaty pri zaťažení opravenej rúry (s poškodením na ploche ϕ 60mm) pretlakom 14,2 MPa pri prieniku tlaku pod záplatu

Porovnanie niektorých numerických výsledkov a experimentálnych meraní uvádzame na obr.9 a obr.10. Namerané údaje pomerného predĺženia prezentuje krivka T1tan. Experimentálne určené hodnoty pomerných predĺžení sú tu znázornené hustými množinami bodov (kvázi hrubými čiarami). Výsledky numerického riešenia sú znázornené bodmi, cez ktoré sú vedené tenké čiary.

V prípade deformácií na rúre v okolí zvaru v mieste obvodového rezu (oblasť nalepenia tenzometra T1tan) uvádzame údaje tesne pri koreni zvaru (T1)1, ako aj o 8 mm ďalej (T1)2.



Obr.9 Závislosť pomernej deformácie od tlaku v mieste T1 a T2 po cyklickom zaťažovaní pri prieniku tlaku pod záplatu. Výsledky numerického výpočtu ležia na čiarach s označením odpovedajúceho tenzometra v zátvorkách



Obr.10 Závislosť pomernej deformácie od tlaku v mieste T3 a T4 po cyklickom zaťažovaní pri prieniku tlaku pod záplatu. Výsledky numerického výpočtu ležia na čiarach s označením odpovedajúceho tenzometra v zátvorkách

Porovnanie vykazuje pomerne dobrú zhodu do vytvorenia krčku pri pomernej deformácii o veľkosti 9%, a tiež vidíme v tejto lokalite vysoký gradient tangenciálnych napätí (v obvodovom smere) spôsobené porušením rotačnej symetrie tuhostí rúry a teda vznikom ohybových napätí. V prípade osových napätí (v oblasti nalepenia tenzometra T2os) takýto gradient nie je možné pozorovať.

ZÁVER

Na základe nelineárnej analýzy opravy korózných väd rôzneho rozsahu na rúre DN 500x8 kruhovými, obdĺžnikovými a zaoblenými obdĺžnikovými záplatami a ich porovnania s experimentálnymi výsledkami pracovníkov VÚZ Bratislava môžeme urobiť nasledovné zovšeobecnené uzávery:

- Rozsah poškodenia rúry má vplyv na napätosť rúry v okolí záplaty dokiaľ nenastane prienik tlaku pod záplatu. Mimo oblasti rúry s imitáciou jamkovej korózie (súvislým zoslabením steny na cca 20% pôvodnej hrúbky) a jej blízkom okolí, bude kritickým miestom pre všetky typy záplat štvorcová, štvorcová so zaoblenými hranami resp.

kruhovú oblasť na vnútornej strane rúry oproti stredú pozdĺžneho kútového zvaru záplaty (resp. „kvázi pozdĺžneho“ zvaru v prípade kruhovej záplaty). Hodnota intenzity napätia v tejto oblasti závisí málo významne na type záplaty, avšak oveľa výraznejšie na rozsahu (imitácie) poškodenia rúry. Pri hodnote konštrukčného pretlaku 6,5 MPa a pri maximálnom poškodení rúry na ploche \varnothing 60 mm dosahovala intenzita napätia v kritickom mieste rúry pri jednotlivých typoch záplat hodnôt:

štvorcová záplata $\sigma_i \approx 355$ MPa

štvorcová záplata so zaoblenými rohmi $\sigma_i \approx 365$ MPa

kruhová záplata $\sigma_i \approx 335$ MPa.

- Pri bezošvej rúre DN500x8 z materiálu 13 030.0 s mechanickými vlastnosťami $R_e = \min 350$ MPa a $R_m = \min. 520$ MPa môže teda dôjsť v kritickom mieste pri tlaku 6,5 MPa k nevýznamnej lokálnej plastizácii.
- Pri prieniku tlaku pod záplatu je napätosť opravenej rúry determinovaná tlakom, pričom na rozsahu poškodenia rúry jamkovou koróziou už prakticky nezáleží. Vplyv tvaru záplaty na napätosť rúry a záplaty je málo významný, pričom v kritickom mieste, t.j. v mieste prechodu kútového zvaru do materiálu rúry v oblasti stredú pozdĺžneho zvaru záplaty (resp. „kvázi pozdĺžneho“ zvaru pri kruhovej záplate) vplyv tvaru záplaty prakticky zaniká. Napätosť v tejto oblasti je výrazne nepriaznivejšia ako napätosť v stave, keď ešte nedošlo k perforácii steny rúry. Pre rovnaký rozsah poškodenia rúry (na ploche \varnothing 60 mm) pri prieniku tlaku pod záplatu bola intenzita napätia v kritickom mieste rúry pri jednotlivých typoch záplaty: štvorcovej, štvorcovej so zaoblenými rohmi resp. kruhovej prakticky rovnaká s hodnotami $\sigma_i \approx 404$ MPa (pri pretlaku 6,2 MPa). Odpovedajúca hodnota intenzity napätia v kritickom mieste záplaty, ktorým je koreň kútového zvaru s pozdĺžnou orientáciou bola $\sigma_i \approx 416$ MPa u prvých dvoch záplat resp. $\sigma_i \approx 402$ MPa pri kruhovej záplate. Pre uvažovaný materiál rúry v prípade perforácie steny rúry dochádza pri pretlaku 6,2 MPa v uvedenom kritickom mieste k výraznejšej lokálnej plastizácii.
- Aj keď z hľadiska výroby záplaty (z rúry najbližšieho väčšieho priemeru) ako aj z hľadiska technológie zvárania je štvorcová záplata najpohodlnejšia a najlacnejšia, zostávajú rohy záplaty (kde sa napájajú kútové zvary) veľkým potenciálnym zdrojom väd zvaru. Tento konštrukčný nedostatok rieši záplata so zaoblenými rohmi. Pre riešené plochy poškodenia (kruh s priemerom \varnothing 60 mm, \varnothing 40 mm resp. \varnothing 13 mm) sa javí štvorcová záplata s menovitým rozmerom $a = 200$ mm, s polomerami zaoblenia rohov $\rho = 50$ mm, a s 1,25-násobnou hrúbkou steny voči hrúbke steny opravovanej rúry ako konštrukčne aj technologicky plne vyhovujúca.
- Verifikácia výsledkov napäťovo-deformačnej analýzy tenzometrickým meraním deformácie v niektorých miestach experimentálneho modelu opravenej rúry pomocou záplat (ktoré vykonali pracovníci VÚZ Bratislava) potvrdila správnosť výsledkov numerickej nelineárnej analýzy výpočtových modelov opravovanej rúry s privarenými záplatami.
- Hodnota vnútorného pretlaku, pri ktorom v prípade rúry DN 500x8 bez záplat dosiahne intenzita napätia (po celej hrúbke steny rúry) hodnotu medze klzu je na základe teoretického výpočtu $p_K = 10,7$ MPa, pri ďalšom náraste tlaku dochádza k plastizácii steny rúry za súčasného spevňovania materiálu. Numerický výpočet MKP stanovil hodnotu hraničného tlaku, t.j. tlaku pri dosiahnutí spevnenia materiálu v dôsledku plastizácie na úrovni medze pevnosti na $p \approx 12,3$ až $12,8$ MPa. Z vykonanej tlakovej skúšky na modeli pri prieniku tlaku pod záplatu (pozri správu

VÚZ) bola určená hodnota tlaku pri strate integrity konštrukcie na $p_m = 10,9$ MPa, pričom porušenie vzniklo pri rohu štvorcovej záplaty s najväčším poškodením rúry. Tu už, prirodzene, nešlo o homogénny izotropný materiál, ale prejavili sa tu všetky materiálové, technologické a prevádzkové (cyklovanie na 2000 cyklov) vplyvy.

LITERATÚRA

- [1] ÉLESZTŐS, P., PODĚBRADSKÝ, J., BENČA, Š., ÉCSI, L., JANČO, R., CHMELKO, V.: *Účinky napätových skúšok na potrubie (stresstest), oprava potrubí pomocou privarených záplat*, Výskumná správa, SPP a.s., Bratislava, 2003
- [2] GRŇO, J., HAMÁK, I., ÉLESZTŐS, P.: *Oprava poškodení potrubia pomocou záplat*, Slovgas XII. Roč.2/2003
- [3] DECHANT, K. E.: *Effects of high pressure testing technique on pipelines*. 1996 OMAE – vol. 5, Pipeline Technology, ASME 1996.
- [4] GAJDOŠ, L. et. al.: *Structural integrity of pressure pipelines*, Transgas a.s., Prague, 2004, ISBN 80-86616-03-7
- [5] TREBUŇA, F., BURŠÁK, M.: *Medzné stavy lomy*, Grafotlač, Prešov, 2002
- [6] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F.: *Odolnosť prvkov mechanických sústav*, Emilena Košice, 2004