

**RESEARCH OF BEHAVIOUR OF CORROSION PITS WITH REFLECTION
PHOTOELASTIC COATINGS
VÝZKUM CHOVÁNÍ KOROZNÍCH DŮLKŮ METODOU REFLEXNÍ POVLAKOVÉ
FOTOELASTICIMETRIE**

Jíra J., Jírová J., Kolář F.

If we cover the pipe with a thin foil of an optically active material, we can monitor the surface deformations of a cylindrical shell by the method of reflection photoelasticity. The data of strain gauge measurements represent comparative data for the evaluation of reflection photoelastic measuring by the computation from compensation measurements of the directions of principal stresses and the magnitudes of the differences in principal stresses. The stress values ascertained by photoelastic measuring have confirmed the complex character of the deformation process in the environs of the models of a solitary pit and adjacent pits.

Úvod

Pro stanovení mezních tlaků při rehabilitaci dlouhodobě provozovaných potrubí vnitrostátního vysokotlakého (vtl) plynovodu byl prováděn výzkum napjatosti a přetvoření stěny trubek. Tato potrubí jsou poškozena během provozu korozí a mají řadu imperfekcí vzniklých při výstavbě a výrobě. Všechny tyto defekty snižují spolehlivost vtl plynovodu a zkracují jeho životnost. Je však zřejmé, že degradační procesy neprobíhají se stejnou intenzitou po celé délce potrubí, ale zpravidla v určitých úsecích působením reálných provozních podmínek a vnějšího prostředí. Cílem výzkumu vtl potrubí přepravního vnitrostátního plynovodního systému bylo nalézt rozhodující informace o jejich pevnosti a provozuschopnosti po dlouhé době provozu, kdy dochází k jeho postupnému stárnutí. To se projevuje degradačními procesy u ocelového materiálu použitých trubek, vznikem korozních defektů a vytvářením lokálních polí s velmi vysokou hladinou napětí ve stěně trubky. Při posuzování spolehlivosti provozovaných potrubí je nutné znát skutečnou velikost napětí a přetvoření ve stěně trubky. Reálné velikosti těchto veličin se často významně liší od teoretických hodnot vypočtených při návrhu vtl potrubí s ideálními rozměry a vlastnostmi.

Korozní poškození, které může významně oslabit stěnu potrubí uloženého v zemi, zejména z vnějšího povrchu, je velmi těžko předvídatelné. Vážné nebezpečí koroze vždy hrozí v místech, kde se u potrubí vnitrostátního plynovodu odtrhne izolace od vnějšího povrchu a vytvoří tzv. kapsy vyplněné v terénu vodou. Rychlost lokálního úbytku stěny vlivem koroze zejména závisí na agresivitě obklopujícího prostředí. Napadení stěny je nerovnoměrné podle kombinace reálných okolností, a proto vznikají korozní poškození různého typu a rozsahu. Jde buď o podlouhlá a dosti ostrá zeslabení, které můžeme chápat jako vruby, nebo vznikají plošně

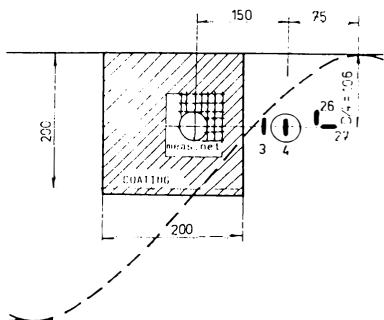
rozsáhlejší a hluboká zeslabení ve tvaru důlků, které se mohou postupně spojovat a procházet do hloubky stěny v nepravidelném reliéfu celkového plošného oslabení.

Proto byl prováděn experimentální výzkum chování korozního důlku ve stěně vtl potrubí, který lokálně mění silový tok, což se projevuje kvalitativními i kvantitativními změnami stavu napětí a deformace. Ve stěně tlakové nádoby vyrobené z dlouhodobě provozovaného potrubí DN 400 byly vyrobeny modely korozních důlků a to osamělý důlek a dva sousedící důlky. Pro vyšetřování rozvoje napjatosti v okolí korozních důlků jsme použili metody povlakové reflexní fotoelasticimetrie [1,7]. Naším cílem bylo sledovat deformační proces v okolí osamělého korozního důlku a okolí jednoho ze dvou sousedících korozních důlků během pevnostní hydraulické zkoušky tlakové nádoby. Výsledky měření umožnily komplexně posoudit lokální změny napětí během zatěžování vnitřním tlakem až do dosažení lokální meze kluzu.

Metoda povlakové fotoelasticimetrie a měření na modelech korozních důlků

Povrch tlakové nádoby v místě důlků byl důkladně mechanicky a chemicky očistěn pro nalepení fólie z opticky citlivé hmoty. K přípravě fotoelasticimetrické (fte) fólie jsme použili nízkoviskozní epoxidový systém, který používá jako reaktivní ředidlo dibutylmaleinát (DBM). Protože bylo potřeba pokrýt fólií zakřivenou plochu, byla pro výzkum použita metoda volného listu vyvinutá Zandmanem. Ke směsi epoxidové pryskyřice a DBM bylo přidáno odpovídající množství tvrdidla P1 a směs byla neustále míchána až do teploty 45°C. Potom se směs nalije do formy, kde asi po 1 hodině dojde ke zgelovatění. Formu tvořila skleněná deska a rámeček ze silikonové pryže, přičemž deska byla separována parami alkylchlorosilanů. Forma byla umístěna na vodorovné desce, vyhříváné automaticky regulovanými topnými vodiči na teplotu 35°C. Fólie v gelovitém stavu byla vyjmuta z formy, byly vystřiženy potřebné tvary, otvor pro důlek byl vyražen speciálním razníkem a fólie byla přichycena na tlakovou nádobu v místě důlků. Za 24 hodin došlo při teplotě 20°C k vytvrzení fólie. Po vytvarování byla fólie sejmuta a přilepena na potrubí směsí lepidla Epoxy 1200 a hliníkového prášku. Tato směs tvořila současně reflexní vrstvu. Pro potřeby fotoelasticimetrického měření byla na fólie v okolí důlků narysována síť měřických bodů. V bodech měřické sítě byly zjišťovány směry hlavních napětí a relativní rozdíly velikostí hlavních napětí.

Modely korozních důlků zeslabovaly stěnu tlakové nádoby o 2/3 tloušťky stěny, tj. zbytková tloušťka stěny byla v místě důlku 2 mm. Průměr důlků byl 30 mm a středy dvou sousedících důlků byly od sebe vzdáleny 45 mm. Pro potřeby vyhodnocování byl ve vzdálenosti 150 mm od středu vyšetřovaného osamělého důlku vyroben další a stejný osamělý důlek tak, aby se navzájem neovlivňovaly. Okolí osamělého důlku bylo polepeno fólií o rozměrech 200x200 mm a tloušťce 3 mm, dno důlku bylo polepeno fólií kruhového tvaru o průměru 30 mm. Stejná fólie byla použita při vyšetřování chování dvou sousedících důlků. Fte fólie byla umístěna tak, abychom získali maximální množství údajů pro vyhodnocení fte měření (obr.1), zejména o chování můstku mezi důlky. Před vlastním fte měřením, tedy při vnitřním tlaku 0 MPa, byl zjištěn počáteční stav napjatosti v reflexní fólii,



Obr.1. Reflexní fólie

Měření pro výchozí nulový zatěžovací stav je nutno provést, protože uvnitř fólie mohou během zpracování vzniknout vlastní pnutí. Tato napětí je nutno potom při vlastním fte měření odečíst od hodnot získaných při kompenzačním měření během tlakování.

Tlakové nádoby byly tlakovány na hodnoty vnitřního tlaku, při kterých měl být měřen stav napětí. Během fte měření byla hodnota tlaku udržována na konstantní výši. Měření napjatosti v okolí osamělého důlku bylo provedeno pro zatěžovací stavy s velikostmi tlaku 3, 4 a 5 MPa a v okolí sousedících důlků pro tlaky 1, 2 a 3 MPa. Byl zakreslen průběh isochromat pro každý zatěžovací stav a kompenzačními měřeními byly zjištěny směry algebraicky větších hlavních napětí a relativní rozdíly hlavních napětí v jednotlivých místech měřické sítě.

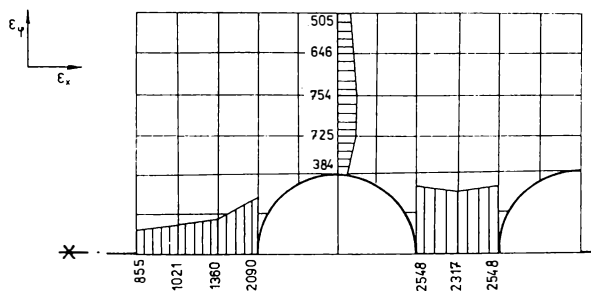
Zároveň s fotoelasticimetrickými měřeními probíhala tenzometrická měření, která v okolí symetricky umístěných modelů důlků vyšetřovala během zatěžování rozvoj lokálních obvodových a podélných přetvoření. Před prováděním vlastních měření byla provedena důkladná diagnostika stěny potrubí, abychom měli jistotu, že materiálové a geometrické charakteristiky v okolí modelů korozních důlků jsou stejné. Tenzometry byly pak nalepeny do vybraných míst v blízkém okolí důlků tak, aby svým umístěním odpovídaly bodům měřické sítě. Tenzometricky naměřené údaje mohly být proto výchozími a srovnávacími hodnotami pro vyhodnocení fotoelasticimetrických měření. Pro využití výsledků tenzometrických měření pro potřeby metody povlakové fotoelasticimetrie byl rozhodující 1. zatěžovací cyklus, kdy deformační procesy nebyly ještě ovlivněny historií zatěžovacích procesů.

Vyhodnocení fotoelasticimetrických měření

K výpočtu obvodových a podélných normálových napětí byl použit počítačový program SIM sestavený ve FORTRAN 77, který byl vytvořen v ÚTAM [3]. Součástí programu je i grafické zobrazení výpočtených hodnot napětí a přetvoření pomocí grafického programu Design-CAD, který umožňuje tisknout grafy na grafickém výstupním zařízení. Jako výchozí hodnoty jsou v programu SIM použity údaje z tenzometrických měření, které byly porovnány s příslušnými rozdíly hlavních napětí získaných z naměřených řádů isochromat ve stejných bodech.

Je zřejmé, že zmenšená tuhost stěny potrubí v místě modelu **osamělého důlku** [2,6] ovlivňuje lokální deformační proces v blízkém okolí důlku. Je to způsobeno redistribucí silového toku v tomto místě. Při zatěžování vnitřním tlakem se okraj důlku chová jako ztužující prvek. V první etapě zatěžování vnitřním tlakem do 3 MPa se jeho obrys prodlužuje v obvodovém směru, o čemž svědčily velikosti obvodových přetvoření ϵ_{θ} v krajních bodech na svislé ose důlku oproti krajním bodům na vodorovné ose. Obrys důlku v podélném směru při první etapě zatěžování projevoval tendenci ke zkracování, o čemž svědčily hodnoty podélných přetvoření ϵ_x . Důlek jako celek se deformuje v přímé závislosti na deformaci stěny trubky. V důsledku toho mění svůj kruhový tvar na eliptický s delší osou v obvodovém směru. Fte měření ukázala, že během dalšího zatěžování do 4 MPa si začíná důlek vytvářet ve svém okolí lokální deformační pole. Dochází k vyboulování deformovaného okraje důlku, přičemž maximální tahová obvodová napětí se přemísťují z krajních bodů na svislé ose důlku do krajních bodů na podélné ose. Tuto redistribuci silového toku rovněž dokumentuje srovnání s hodnotami přetvoření při zvyšování zatížení vnitřním tlakem do 5 MPa. Při tomto zatěžování dochází již v blízkém okolí osamělého důlku k přechodu do plastického stavu. Analýza stavu deformace ukazuje, že lokální oblast přetvoření s daleko vyšší hladinou obvodového napětí, než které je dosaženo v neoslabené stěně trubky, se rozšiřuje ve třetí etapě deformačního procesu všemi směry. Okolí důlku vytváří vlivem lokálních ohybových napětí útvar, který se vybouluje vně klasicky deformované stěny trubky. Tento deformační proces pokračuje nadále tak, že dochází k opětovnému vytvoření koncentrované tahové zóny ve dně důlku, až dojde plastickou deformací k porušení zeslabeného dna ve tvaru podélné trhliny

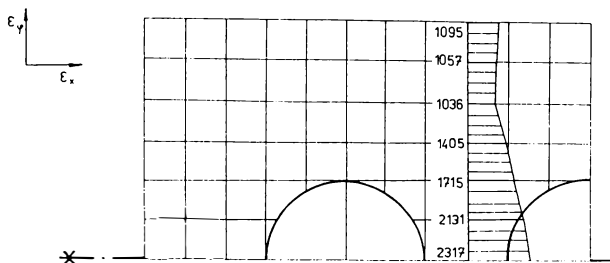
Případ dvou sousedících důlků [4,5,6] je nebezpečnější z hlediska pravděpodobnosti vzniku porušení, neboť k zplastizování materiálu v lokální deformační oblasti dochází při nižších hodnotách zatížení tlakové nádoby vnitřním tlakem. Proto fte měření bylo prováděno u tlakové



Obr. 2. Obvodová přetvoření v podélném směru při zatížení 3 MPa

nádoby DN 400 pro zatížení vnitřním tlakem 1, 2 a 3 MPa. Při měření se zjistilo, že obraz isochromat není v okolí důlku přesně symetrický z hlediska horních a dolních měřických bodů a také umístění singulárních bodů se mírně lišilo. Při proměření stěny tlakové nádoby se ukázalo, že materiál použitý pro výrobu šroubovicově svařovaných trub má v rámci povolené výrobní tolerance rozdílnou tloušťku stěny.

V případě dvou sousedících důlků ke kritické oblasti oslabeného dna důlku přistupuje ještě spojovací můstek neoslabené stěny mezi sousedícími důlky, kde dochází k vysokým koncentracím napětí, neboť zde vzniká soustředění silového toku. Vlivem snížené tuhosti stěny v důsledku existence důlku a jejich tvarových změn na eliptický je zde na okraji malá tlaková zóna podélných napětí a vysoká koncentrace velkých tahových napětí. Jsou zde vysoké hodnoty obvodového přetvoření (obr.2 a 3) od tahového napětí oproti přetvořením v běžné neoslabené stěně potrubí (až 6 násobně při zatížení 3 MPa). V případě velmi blízkých důlků se oblast okolo sousedících důlků v průběhu deformačního procesu bouli prakticky jako celek. Z experimentální analýzy plyne, že pokud by deformace v plné stěně trubky dosáhla velikosti odpovídající zatížení na mezi kluzu, tak by celková deformace mezi důlky dosáhla flowstress, což již není přijatelné.



Obr. 3. Obvodové přetvoření v obvodovém směru při tlaku 3 MPa

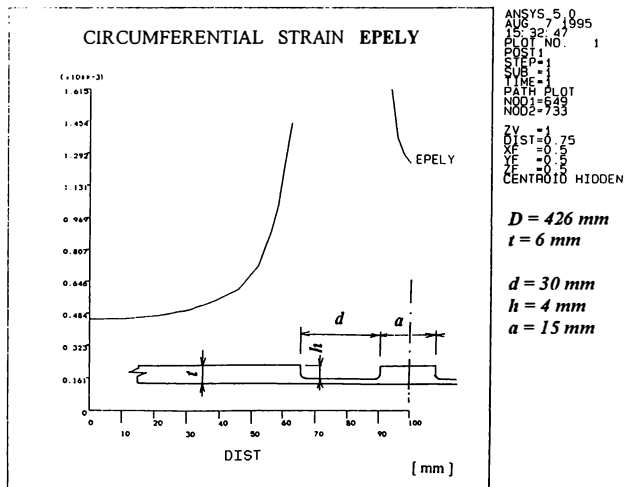
Závěr

Ukazuje se, že při stoupajícím přetlaku reaguje důlek, pokud je dosti hluboký, řadou deformačních nestabilit. V podstatě lze říci, že při nižších úrovních vnitřního tlaku se chová dno důlku jako pružné a to, i když je relativně slabé. Nejpodstatnější je úroveň přetlaku, který vyvolá počáteční plastickou makrodeformaci ve stěně potrubí na okrajích důlků. Lokální účinek sousedících důlků je mnohem nebezpečnější než vliv osamělého korozního důlku. Je to způsobeno interakcí rozvíjející se plastické deformace v blízkém okolí obou důlků.

Obecně lze říci, pokud nejsou oslabení příliš hluboká, tj. pokud nepřesahují 1/2 základní tloušťky stěny, nemůže u vnitrostátního vtl. plynovodu vyrobeného z oceli s velkou zásobou plasticity, při jednorázovém nebo 2x opakovaném zvýšení napětí k mezi kluzu, vzniknout závažné poškození v takto oslabených místech. Naopak určité malé zpevnění materiálu, jak v materiálu můstku, tak ve dně důlku má pozitivní význam pro spolehlivost a životnost potrubí.

Pro odvození výpočtových modelů [6,7] korozních důlků bylo použito poznatků z experimentálního výzkumu. Výpočtové modelování pole deformace a napětí v okolí osamělého korozního důlku a dvou sousedících důlků bylo provedeno pomocí programu ANSYS 5.0. Okolí důlku bylo modelováno trojrozměrně na výřezu trubky konstantní tloušťky. Důlek měl kruhový tvar a konstantní hloubku. Pro danou úlohu byl použit izoparametrický prostorový prvek SOLID 95 s 20 uzly. K vytvoření uzlů úlohy byla použita automatická tvorba sítě s hustším dělením na elementy na hranici důlku.

Na základě zkušeností získaných odvozením výpočtového modelu chování osamělého korozního důlku byl vypracován výpočtový model chování dvou sousedících důlků tak, aby mohl být vyšetřován rozvoj přetvoření v nezeslabeném můstku mezi blízkými důlky. Průběh grafu vypočtených obvodových přetvoření (obr.4) u dvou sousedících důlků na základě výpočtového modelu odpovídá výsledkům získaných metodou reflexní fotoelastimetrie (obr.2) při pevnostních hydraulických testech tlakových nádob.



Obr.4. Obvodové přetvoření podle výpočtového modelu

Provedené pevnostní zkoušky prokázaly, že použití povlakové fotoelasticimetrie pro vyšetřování pole napětí v pružném oboru v blízkém okolí korozních důlků na povrchu stěny tlakové nádoby vyrobené z vtl potrubí je kvalitativně a mnohdy i kvantitativně dostatečně přesné a finančně a časově nenáročné. Přesnost výsledků závisí na pečlivém provedení povlaku opticky citlivé fólie, na kvalitním fotoelasticimetrickém měření a na zajištění co nejpřesnějších vstupních údajů pro vyhodnocování. Metoda fotoelasticimetrie nám pak dává názorný obraz rozvoje lokálního deformačního procesu během zatěžovacího procesu a přehled o místech s koncentracemi napětí, které jsou významné pro vznik porušení. Zároveň lze zpětně použít výsledků fotoelasticimetrických měření pro nová tenzometrická měření, kdy můžeme nalepit tenzometry přesně do míst na konstrukci, které potřebujeme kvantitativně vyšetřit z hlediska špiček nebezpečných napětí.

Literatura

1. Jira J., Junková S.: Výzkum chování korozních důlků ve stěně potrubí 426/6 mm metodou reflexní fotoelasticimetrie. Výzkumná zpráva ÚTAM 1993.
2. Junková S., Jira J., Kolář F.: Využití reflexní fotoelasticimetrie při výzkumu defektů potrubí. Sb. 31 konference EAN 93, Měřín 1993.
3. Junková S., Roun P.: Numerické vyhodnocování fotoelasticimetrického měření. Výzkumná zpráva ÚTAM 1994.
4. J.Jira: Permissible Corrosive Damage and Its Influence during Rehabilitation of High-Pressure Gas Pipelines. Proc. of 3rd International Technical Colloquium "Reliability & Rehabilitation of Old High-Pressure Pipelines", Prague, March 1994, pp.18-22.
5. Jira J., Jirová J., Pařízek P.: Experimental Analysis of Strength of Pipelines with Defects. Recent Advances in Experimental Mechanics, vol.1. A.A.BALKEMA / ROTTERDAM / BROOKFIELD / 1994, pp.449-455.
6. J.Jira, J.Jirová, M.Micka: Experimental and Numerical Modelling of Behaviour of Corrosion Pits of Pipeline. Proc.of 16.th Symposium on Experimental Mechanics of Solids, Jachranka, October 1994, pp 108-112.
7. Jira J., Jirová J., Micka M., Němec J.: Hybrid method of assessment of reliability of pipeline damaged by corrosion. Proc. of Ninth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Politecnico di Milano, A.Rovetta et all eds, August 29-September 2, 1995, vol.4, pp 2534-2537.

Výzkum je podporován grantem GA ČR č.103/94/0418

*Doc.Ing. Josef Jira, CSc., Ing. Jitka Jirová, CSc.,
Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Prosecká 76, 190 00 Praha 9,
telefon: 88 23 34, 88 25 80 FAX: 88 46 34
RNDr. František Kolář,
Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8,
telefon: 66 009 258 FAX: 68 80 105*