

VLIV INTERAKCE KOROZNÍCH PLOŠNÝCH VAD NA MEZNÍ STAV PORUŠENÍ DÁLKOVÝCH PLYNOVODŮ

INFLUENCE OF THE CORROSION SURFACE DEFECTS' INTERACTION UPON THE LIMIT STATE OF BURST OF TRANSMISSION GAS PIPELINES

František Valenta, Jiří Michalec, Ctirad Novotný, Jan Řezníček, Milan Růžička.,
Miroslav Španiel., Miroslav Sochor¹

Abstract:

This paper deals with the determination of the limit burst state of a gas-pipeline damaged by surface corrosion defects creating clusters. Both experimental and numerical analysis of the limit state of the pipeline was carried out for the DN 800 x 11.4 pipe made of the X 60 steel. A numerical calculation was executed by means of the finite element method (FEM) when using the ABAQUS and ANSYS softwares. To study the defect-stress field interaction on the pipeline surface, a configuration of an oval defect (defect 1) and four pits (defect 2) was selected. The span between defect 1 and defect 2 was designed to match a condition achieving the limit burst pressure of the pipeline containing either the single defect 1 or defect 2 (when their interaction has a limited influence). The limit state was determined by applying our own LLCC (Limit load carrying capacity) method. Based on a FEM preliminary solution of the problem, an experimental destruction test of the testing pipe with defects mentioned above was carried out. A FEM calculation, simulating the experiment executed, concluded the problem. Another real pipe model was analyzed after welding the fractured pit (resulting from the previous experiment). This calculation was divided, in accordance with the new experiment, into two cycles: 0-8.50 MPa and 0-9.23 MPa. An comparison of numerical and experimental results was performed for the locations of the applied strain gauges. In dependence on the stress value changes at the selected defect places, evaluated was the defect stress field interaction. It was proved that, already from pressure of 5 MPa, the defect configuration was behaving as one large defect.

This grant is supported by GACR no. 106/98/1423

Klíčová slova: plynovod, koroze, shluk defektů, interakce, experiment, MKP, mezní stav

1. Úvod

Korozní poškození tranzitních plynovodů nepředstavuje jen vážné ekonomické ztráty, ale také nebezpečí ohrožení majetku a života lidí. Nebezpečné jsou zejména plošné defekty vznikající "srůstáním" jednotlivých korozních důlků. Mezi těmito poškozeními se vytvářejí dílčí můstky neztenčené tloušťky stěny. Tyto můstky mohou vznikat jak v osovém, tak v obvodovém směru na povrchu trubky. Ukázalo se, že rozhodující jsou rozměry vad a tedy i

¹ Prof. Ing. František Valenta, CSc., Doc. Ing. Jiří Michalec, CSc., Ing. Ctirad Novotný, Ing. Jan Řezníček, CSc., Doc. Ing. Milan Růžička, CSc., Ing. Miroslav Španiel, CSc., Doc. Ing. Miroslav Sochor, CSc., ČVUT v Praze, fakulta strojní, ústav mechaniky, odbor pružnosti a pevnosti, Technická 4, 166 07 Praha 6, tel. 02/24352561, e-mail: novotny@u-205.fsid.cvut.cz

šířky mřížek zejména ve směru podélné osy trubky. Jedním z cílů řešeného úkolu bylo experimentálně a výpočtově ověřit vliv vzájemné interakce velkoplošných vad na mezní stav porušení.

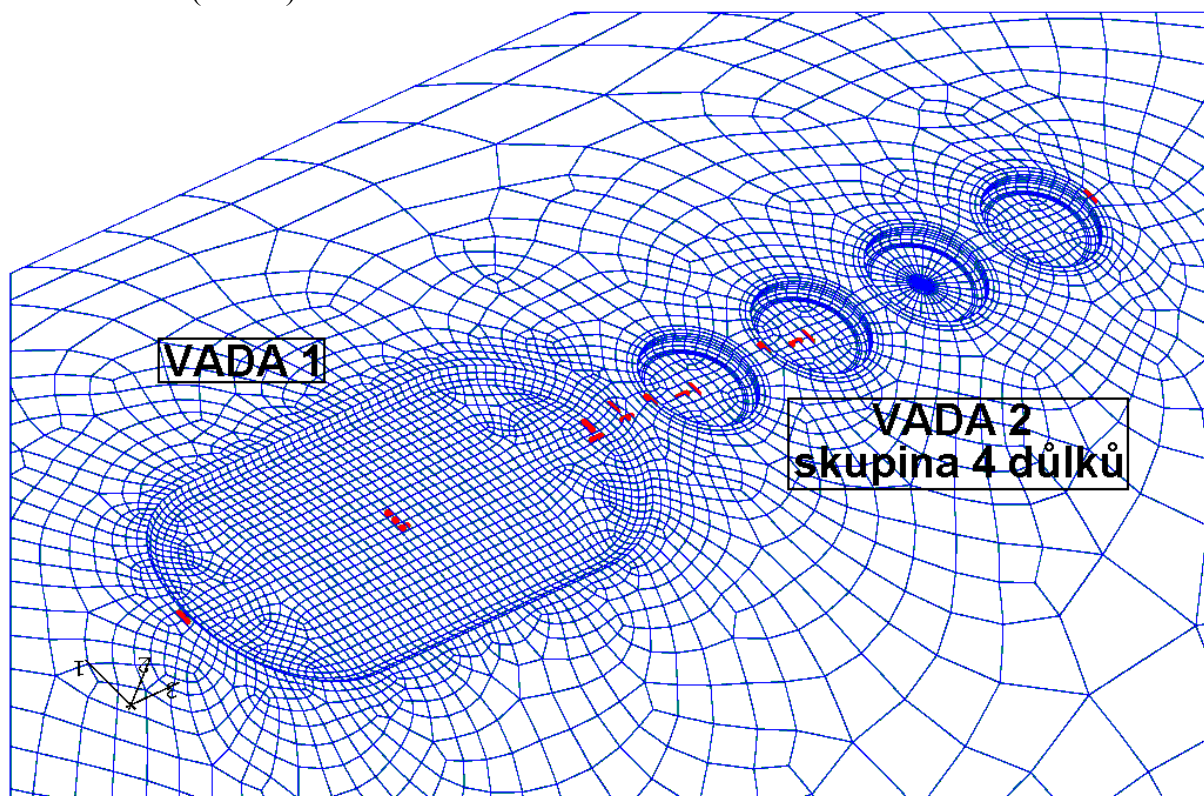
2. Analýza defektů na plášti potrubí

Jako zkušební těleso, na kterém byla provedena analýza defektů, byla zvolena trubka DN 800 x 11,4 zhotovená z materiálu X 60. Numerická analýza napjatosti a deformace trubky s defekty byla prováděna metodou konečných prvků (MKP). Před provedením vlastního experimentu bylo nutné stanovit geometrii modelových defektů a umístění tensometrických snímačů. K tomu posloužily předběžné výpočty MKP. Konečný výpočet MKP proběhl až po experimentu. Byla v něm zohledněna předčasná destrukce zkušebního tělesa, jeho následná oprava a opětovné zatěžování do destrukce. Na základě této analýzy byla prokázána schopnost použitého programu simulovat i poměrně složité provozní cykly.

Všechny výpočty MKP byly provedeny programovým aparátem ABAQUS verze 5.8 firmy HKS. Modely byly generovány preprocesorem programu ANSYS 5.4 s využitím maker a kompilátoru "an2aba". Pro zpracování výsledků výpočtů k určení tvaru plastických oblastí byl vyvinut program "abaplast".

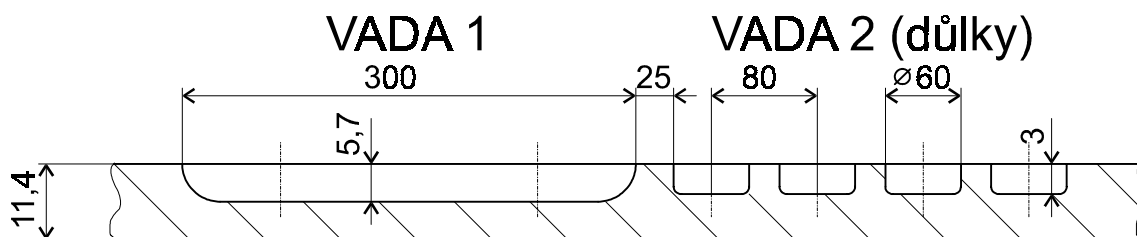
2.1. Předběžné výpočty numerické analýzy

Ke studiu interakce polí napjatosti vad na plášti potrubí byla zvolena konfigurace jednoho oválného defektu (vada 1) a defektu tvořeného čtyřmi důlky (vada 2) - viz obr. 1 a 2. Defekty této konfigurace leží v jedné přímce orientované rovnoběžně s podélnou osou potrubí. Hloubka oválného defektu byla zvolena jako polovina nominální tloušťky stěny potrubí, tj. 5,7 mm. Pro určení hloubky důlků byla stanovena podmínka rovnosti mezního tlaku potrubí se samotným již definovaným oválným defektem (vada 1) a potrubí se samotnou čtveřicí důlků (vada 2).



Obr. 1

Pro tuto analýzu bylo nutné vytvořit MKP model trubky se samotnou oválnou vadou (vada 1) a MKP model se samotnou skupinou důlků (vada 2). Mezní tlak byl určován metodikou MVMT vyvinutou na našem pracovišti. Východiskem MVMT je hypotéza, že o mezním stavu plastické únosnosti skořepiny rozhoduje rozložení plastické deformace v objemu tělesa.



Obr. 2

Rozměry můstků mezi defekty byly navrženy na základě předchozích výzkumů vlivu vzdálenosti defektů na charakter jejich interakce [2]. Na základě již zmíněné podmínky byla zbytková tloušťka stěny trubky v důlcích stanovena na 3 mm. Vzdálenosti mezi jednotlivými důlky vady 2 byly navrženy tak, aby se z hlediska rozložení elastické napjatosti v oblasti můstků chovaly jako jedna vada. Vzdálenost mezi vadou 1 a 2 byla navržena tak, aby pole elastické napjatosti v můstku 1 necharakterizovalo jejich propojení zcela jednoznačně. Poslední předběžnou analýzou byl výpočet celkového defektu, který byl složen z vady 1 a vady 2.

Všechny modely MKP byly tvořeny segmentem potrubí s příslušným defektem a byly modelovány jako třídímní s využitím isoparametrických elementů s kvadratickou interpolací pole posuvů a s „plnou“ numerickou integrací typu 3 x 3 x 3. Topologicky se jedná o šestistěny nebo pětistěny typu trojúhelníkové prisma. Síť jsou plně kompatibilní.

2.2. Experimentální analýza

Na základě předběžných výpočtů MKP byly na zkušebním tělese (trubce) vybroušeny modelové defekty a polepeny tensometrickými snímači. Celkem bylo na zkušebním tělese instalováno pro měření ve vadách a jejich okolí 20 samokompenzačních odporových tenzometrů fy HBM. Celé vlastní měření proběhlo v areálu SVÚM a. s. v Praze Běchovicích. Zkušební těleso bylo podrobeno šesti zkušebním cyklům zatěžování zvyšujícím se vnitřním tlakem média v trubce. Při jednom z cyklů došlo již při tlaku 8,58 MPa k předčasné destrukci v jednom z důlků vady 2. Příčinou předčasné destrukce na neočekávaném místě byla patrně nedodržaná geometrie vad při výrobě. Poškozený důlek byl zavařen a pokračovalo se v tlakování až do destrukce. Ke konečné destrukci došlo při tlaku 9,23 MPa.

2.3. Konečné výpočty numerické analýzy

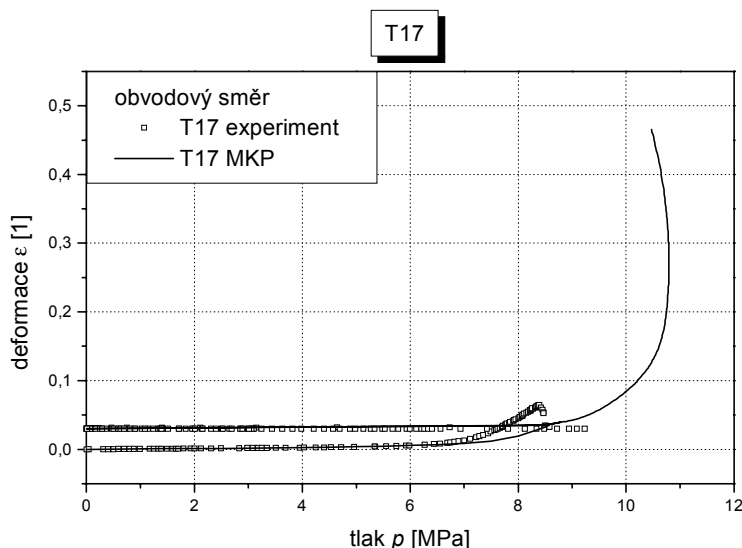
Konečný výpočet byl proveden až po experimentu, který do značné míry simuloval. Byl analyzován reálný model, který byl použit při experimentu. Konečný výpočet celého defektu se od výpočtu předběžného liší v rozměrech vad a materiálových datech. Zatímco u předběžného výpočtu byla brána tloušťka stěny jako nominální, konečný model respektuje průměrnou skutečnou tloušťku stěny v oblasti defektů. Při výrobě důlků vady 2 byl použit jiný radius přechodu mezi válcovou částí a dnem důlků. Dále byla v konečném výpočtu použita materiálová křivka získaná ze vzorků z měřené trubky. Konečný výpočet respektuje skutečný průběh zatěžování včetně předčasného lomu a opravy. Při předběžném výpočtu nebyl průběh ještě známý a zatěžování bylo monotónní, stejně jako u výpočtu samostatné vady 1 a vady 2.

Tento model byl zatěžován v cyklu 0 - 8,58 a 0 - 9,23 MPa. Po odlehčení byla modelována oprava porušení a proběhlo nové zatěžování. Vytvoření MKP modelu a jeho sítě je analogické jako u předběžných výpočtů. Oprava poškozeného zkušebního tělesa (druhý cyklus) byla simulována s využitím funkcí pro deaktivaci a reaktivaci elementů.

Ve druhém cyklu pokračoval výpočet až do tlaku $p = 8,8 \text{ MPa}$, kdy byla ztracena konvergence. Po ztrátě konvergence byl proveden restart úlohy, ve kterém byla použita metoda délky oblouku (konkrétně její modifikace dle Rikse), která je implementována v programu ABAQUS. Tato metoda je vhodná pro řešení úloh o ztrátě stability. Její podstatou je zahrnutí parametru zatěžování mezi neznámé. Použití této metody umožnilo dále zatěžovat model až do tlaku, který je skutečným bodem ztráty stability numerického modelu.

3. Srovnání výsledků numerické a experimentální analýzy

Srovnání numerických a experimentálních výsledků bylo provedeno v místech tensometrů. Při numerickém řešení MKP byly tensometry modelovány nosníkovými prvky. Průřez elementů byl velmi malý a tuhost materiálu byla o dva řády menší než u tělesa trubky. Mezi prvky tensometrů a vlastním tělesem byla před zatěžováním zavedena pevná vazba. Při vyhodnocování byly hodnoty poměrných prodloužení na jednotlivých elementech tenzometru průměrovány, takže hodnoty stanovené MKP v tomto smyslu odpovídají hodnotám měřeným. Experimentální hodnoty byly změřeny do tlaku 8,4 MPa. U tensometrů při numerickém řešení byla použita od tlaku $p = 8,78 \text{ MPa}$ metoda délky oblouku při druhém cyklu. Metoda délky oblouku se používá při výpočtech nestabilních řešení. Proto je na průbězích možno pozorovat pokles tlaku v závěrečné fázi zatěžování. Poměrně dobrá shoda experimentálních hodnot a numerických hodnot byla dosažena u většiny tensometrů. Příklad srovnání experimentálně zjištěných hodnot deformace ε a hodnot získaných z numerického řešení MKP je uveden na obr. 3 pro tensometr umístěný na můstku mezi vadou 1 a 2 u hrany dřílku vady 2.

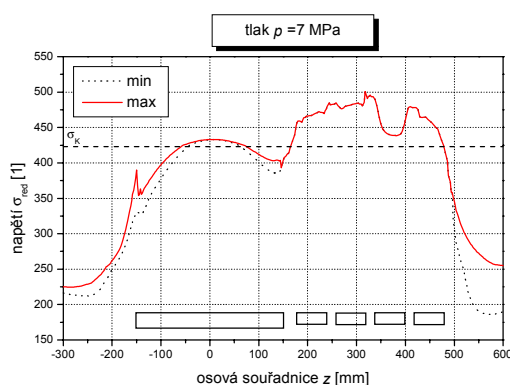


Obr. 3

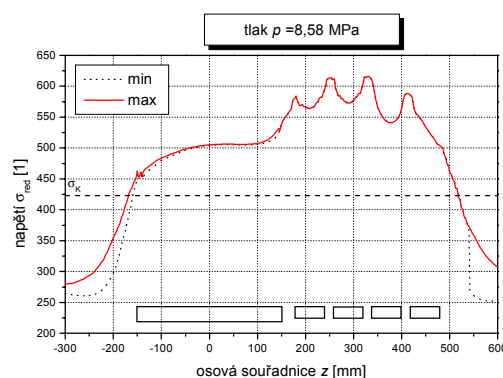
4. Zhodnocení interakce polí napjatosti vad

Jedním z cílů numerické analýzy řešeného případu bylo posouzení míry interakce polí napjatosti vady 1 a vady 2 na plášti potrubí zvolené konfigurace. Z dat získaných konečným výpočtem MKP byly pro dané výpočtové tlaky p odečteny maximální a minimální hodnoty redukovaného (teorie HMM) napětí σ_{red} a tečného napětí σ_t podél řezu v rovině procházející současně osou trubky a podélnou osou defektů (vada 1 a 2).

Pro hodnoty napětí σ_{red} a σ_t byly vytvořeny grafy závislosti napětí na podélné souřadnici z pro dané tlaky p . Výběr z grafů je zobrazen na obr. 4 a 5 zároveň s vyznačenými oblastmi defektů (znázorněno obdélníky v jednotlivých grafech).



Obr. 4



Obr. 5

Experimentální tenzometrická analýza a analýza MKP mimo jiné sledovala i vzájemné ovlivňování elastické i plastické deformace a napjatosti a z nich vyhodnocených napětí v rozhodujících místech na těchto můstcích a při volném okraji vad. Z uvedených průběhů je zřejmé, že:

- Pro tlak 1 MPa , jsou deformace i napětí ve všech vyhodnocovaných místech v elastické oblasti. Z průběhů je patrné, že k největším koncentracím dochází ve schodě s teorií pružnosti na okrajích plošné vady i na okrajích vad důlkových. Je zřejmé, že dochází ke vzájemnému ovlivňování jednotlivých důlků ve vadě 2, což vede ke zvětšení koncentrací napětí při krajích můstků mezi nimi. Vlivem namáhání zeslabených stěn na dně důlků dochází i ve středu důlkových vad k extrému koncentrace, která je jen o málo nižší, než koncentrace napětí na okraji důlků. V elastickém stavu je však patrné, že napětí uprostřed můstku mezi vadou 1 a 2 je pod mezí kluzu ($\sigma_K = 423 \text{ MPa}$) a nedochází tak k jeho proplastizování a to až do tlaku cca 7 MPa .
- Při tlaku 7 MPa , jak ukazuje obr. 4, je již dosaženo v můstku mezi vadou 1 a 2 právě hodnot na mezí kluzu materiálu. Protože je tento tlak velmi blízký maximálnímu provoznímu tlaku, lze považovat tuto šířku můstku za hraniční. Bylo záměrem experimentu najít odpovídající mezní šířku můstku a experimentálně i výpočtově ji ověřit. Dalším nárůstem tlaku na $8,58 \text{ MPa}$ (obr. 5) a výše dochází již k přímému propojování plastických zón obou vad vady 1 a vady 2 a k přímé interakci obou vad.
- Po zavaření důlku byly provedeny výpočty napětí i pro takto upravenou geometrii trubky. Průběhy sledovaných napětí a koncentrátorů při tlaku $9,23 \text{ MPa}$ ukazují, že oba defekty jsou spojeny plastickou zónou v jeden celek a uplatňuje se lokální vyztužení v opraveném důlku způsobené dodatečným svarem.

- Teprve při tlaku 10,0 MPa, který již převyšuje experimentálně určený tlak destrukční 9,23 MPa by došlo i v tomto zavařeném důlku k vyrovnání napjatosti a koncentrací na úroveň okolního materiálu.

5. Závěr

Z informací získaných výpočty MKP a z experimentu lze učinit následující závěry:

- MKP výpočty ukázaly, že řada čtyř hlubokých důlků (vada 2) s můstkem o velikosti 20 mm se chová jako jeden velký defekt. Již při vnitřním tlaku nad 2,0 MPa dosahují špičky redukovaných napětí meze kluzu materiálu a uvnitř důlků i na okrajích můstků se počínají vytvářet plastické zóny, které se při zvyšujícím tlaku propojují.
- Oválná vada 1 vykazuje v elastickém stavu (do 4,0 MPa) stav napjatosti analogický, jako by nebyla vadou 2 výrazněji ovlivňována.
- Zatímco volný (levý) okraj oválu (vada 1) zůstává i při tlaku v trubce nad 4,5 až 5,0 MPa v elastické oblasti, dochází již na jeho pravé straně a zejména na důlcích při levém okraji vady 2 ke vzniku prvních plastických deformací. Tento tlak lze tak považovat za počátek interakce vady 1 a 2. Avšak ani do provozního (zkušebního) tlaku nedochází k průniku této plastické zóny přes celý můstek mezi vadami 1 a 2. Do tohoto tlaku lze šířku tohoto můstku považovat za nadlimitní, resp. ležící v blízkosti takového limitu.

Z výpočtů MKP vychází, že k proplastizování a vytvoření jedné plastické oblasti obou vad dochází při tlaku v trubce cca 8,5 MPa. Protože tento tlak je poněkud nižší, než činil experimentální tlak při destrukci (9,23 MPa), lze pokládat v elasto-plastickém stavu šířku můstku mezi vadami 1 a 2 za mírně podlimitní.

Literatura

- [1] Valenta, F., Michalec, J., Konvičková, S., Růžička M., Řezníček J., Sochor, M., Španiel, M.: Assessment of a transmission gas pipeline destruction, Ageing of Materials and Methods for the Assessment of Lifetimes of Engineering Plant, CAPE 97 1997 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 8746.
- [2] Valenta, F., Sochor, M., Řezníček J., Novotný, C.: Interakce pole napjatosti sousedních korozních defektů na potrubí plynovodů, 37. mezinárodní konference EAN'99, Frenštát p/R, červen 1999.
- [3] Valenta, F., Sochor, M., Růžička M., Novotný, C.: Stress field interaction of gas pipeline neighbouring corrosion defects, The fourth international conference on theoretical and experimental problems of materials engineering, Púchov, září 1999.
- [4] Valenta, F., Michalec, J., Konvičková, S. a kol.: Vliv plošných korozních defektů na mezní stav porušení tlakových těles, výzkumná zpráva 2051/99/35, ČVUT v Praze, fakulta strojní, ústav mechaniky, odbor pružnosti a pevnosti, leden 2000
- [5] Valenta, F., Španiel, M., Michalec, J., Růžička M., Novotný, C.: Mezní stavy porušení plynovodů s korozními plošnými povrchovými defekty, 9. mezinárodní kolokvium Rehabilitace vysokotlakých plynovodů po dlouhé době jejich provozu, Praha, březen 2000.