

**ZPŘESNĚNÍ MEZNÍ KŘIVKY PRO URČENÍ ZBYTKOVÉ
PEVNOSTI TRANZITNÍCH PLYNOVODŮ S KOROZNÍMI VADAMI.
IMPROVEMENT OF LIMIT CURVE DETERMINING REMAINING
STRENGTH OF TRANSIT GAS PIPELINES WITH CORROSION
DEFECTS.**

F. Valenta, M. Sochor, J. Michalec, M. Španiel, M. Růžicka

Klíčová slova: plynovody, korozní vady, mezní stav únosnosti

Material of transit gas pipelines (TG) is exposed to a number of corrosion mechanisms which can lead to the TG failures. The economic consequences of reduced operating pressure, or lost production, repair or replacement are severe. Engineering assessment methods are therefore applied to assess the fitness-for-purpose of operating pipelines containing corrosion.

Tranzitní plynovody (TP) mohou být vystaveny celé řadě korozních mechanismů, které mohou znamenat snížení jejich zbytkové pevnosti a tím omezení provozního tlaku nebo provozní selhání. Hospodářské důsledky omezeného provozního tlaku, nebo úplného zastavení dodávky plynu, oprav či výměny vadných částí znamenají velké finanční ztráty. Z toho důvodu se na vadná potrubí aplikují metody pro vyhodnocení jejich zbytkové pevnosti a další provozuschopnosti. Dosud ve světě široce užívané kritérium B31 G amerického standardu ANSI/ASME má poloempirický charakter a je značně konzervativní, zvláště při jeho aplikaci na materiály vyšší třídy, jako jsou X 60 až X 80, z nichž jsou trubky pro TP vyráběny. Na katedře pružnosti a pevnosti, fak. strojní, ČVUT Praha, byl zahájen před deseti roky výzkum zaměřený k vypracování podkladů pro hodnocení korozních vad, které vycházejí z teoretické analýzy únosnosti poškození a z vyhodnocování na základě pečlivě volených experimentů.

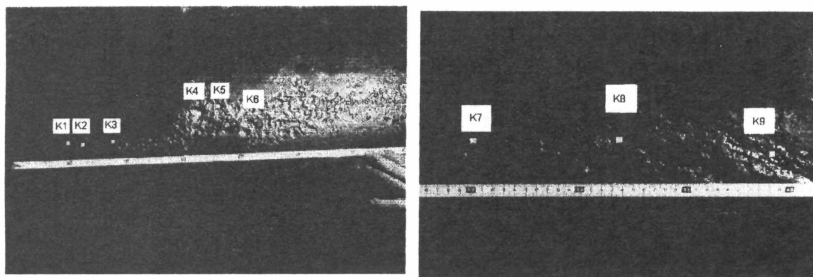
V roce 1995 se výzkumný program zaměřil na dva hlavní cíle:

1. Pokračování teoretické a experimentální analýzy problému.
2. Aplikace dosud dosažených výsledků se zaměřením na nálehavé problémy vznikající při provozu TP.

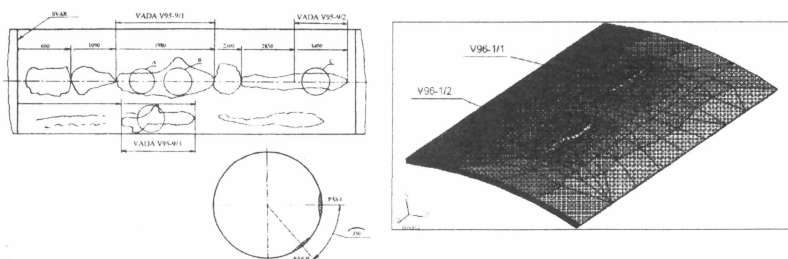
V první řadě bylo provedeno vyhodnocení dosud dosažených teoretických a experimentálních výsledků, týkajících se uměle vyrobených vad imitujících plošné korozní vady povrchu potrubí. Byla vyvinuta nová metodika výpočtu mezního tlaku (MVMT) pro stanovení zbytkové životnosti, spolehlivosti a bezpečnosti plynovodů s reálnými korozními vadami.

Teoretický přístup byl zpřesněn a kromě materiálové nelinearity se uvažuje též nelinearita

geometrická. Přesnější matematický model způsobil necitlivost kritického rozsahu plastické oblasti na hodnotě mezního tlaku, což vyvolalo nutnost definice nových stavových parametrů pro určování mezního zatížení zkorodované trubky. K tomu účelu bylo využito poznatku, zjištěného teoreticky a potvrzeného experimentálně, že extrémní hodnoty radiálních posuvů v procesu zatěžování uchovávají stále stejnou polohu a na základě tohoto jevu byl definován relativní kritický rozsah plastické zóny při mezním tlaku. V posledním období se náš výzkum zaměřil, vzhledem k problémům se zkorodovanými trubkami odhalenými při inspekci jedné linie TP, na stanovení mezní pevnosti trubek s reálnými vadami plošného typu s řadou různě hustých skupin pittingů, viz obr.1, které označíme V94-12/1 a V94-12/2. První hodnocení potrubí s přirozenými vadami bylo zajímavé též z hlediska požadavku stanovení zbytkové životnosti trubek s uvažováním možnosti pokračující koroze v následujících dvou letech (předpokládaný úbytek materiálu cca 2 mm) do příští inspekce inteligentním ježkem.



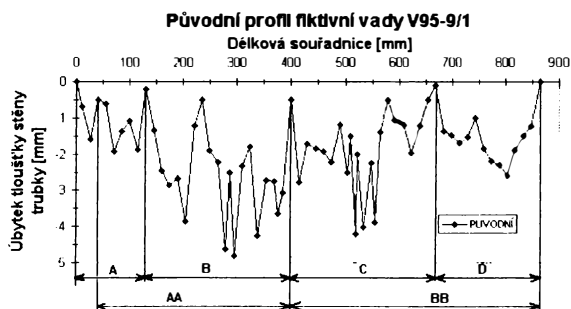
Obr. 1: Reliéfy vad V94-12/1 (vlevo) a V94-12/2 (vpravo)



Obr. 2: Vady V95-9/1 a V95-9/2 (vlevo), MKP-síť vad V96-1/1 a V96-1/2 (vpravo)

Pro výpočet to znamenalo prosté zmenšení tloušťky korozních vad o 2 mm; pro realizaci experimentálního ověření byl tento problém vyřešen tak, že byla odstraněna vrstva materiálu o tloušťce 2 mm na vnitřním povrchu trubky pod korozními vadami; tyto upravené vady označíme V94-12/1M a V94-12/2M. Pro vytvoření sítě konečných prvků byl zvolen následující postup: vada byla posouzena z hlediska vytipování nejnebezpečnějších vzájemně se neovlivňujících lokalit

a z nich pak byly sejmuty odlitky, které sloužily k zjištění geometrie vad. Tyto odlitky byly dále využity k posouzení vad na základě standardů ANSI/ASME. Při řešení jiného problému z praxe, kdy bylo třeba určit zhytkovou pevnost přirozených vad pásového charakteru ve směru osy trubky, které označíme V95-9/1, V95-9/2 a V95-9/3 (viz obr.2), bylo postupováno podobně. Avšak nutnost použití jiných přístrojů na odměření geometrie odlitků vad vyvolala např. nutnost vytvoření pozitivních odlitků z odlitků prvotních (negativních) a použití jiného vhodného materiálu, který byl pro jiný typ snímáního přístroje dostatečně tuhý. Z uvedeného je zřejmé, že takto získávaná geometrie přirozených vad je časově náročná. V současné době probíhá na naší katedře vývoj zařízení, které umožní digitální popis geometrie vad v terénu. Posuzována byla vada V95-9/1, ve které došlo k lomu při destrukční zkoušce. Na základě analýzy odlitku byl získán profil vady, viz obr.3, jehož rozbořením byly stanoveny dílčí vady AA, BB, jejichž posouzení je zde uvedeno. Pro experiment bylo nutno stanovit pro konkrétní konfigurace vad umístění tenzometrů, určené lokalitami s počítací predikovanými extrémními deformacemi a možností realizace jejich instalování vzhledem k členitému reliéfu přirozených korozních vad.

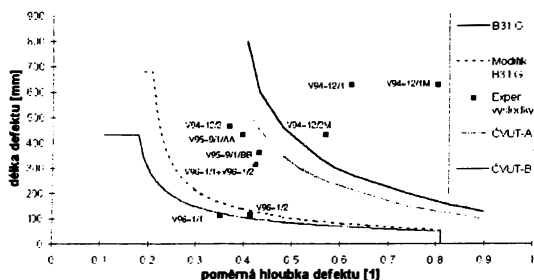


Obr. 3: Reliéf vady V95-9/1

Poslední posouzení přirozených korozních vad TP naší katedrou na podzim r.1995 se týkalo trubky v zásepu, na které nelze provést experimentální ověření včetně destrukční zkoušky. Jednalo se o vady na provozované lince, které byly odkryty na základě zjištění inteligentním ježkem. Tyto vady se blíží diskontinuálnímu charakteru a jejich topologie byla zjištěna v terénu odměřením půdorysu a hloubek jednotlivých míst. Na obr.2 je vyznačena jejich MKP-síť. Vady V96-1/1 a V96-1/2 jsou situovány blízko sebe po obou stranách obvodového svaru. Byla ověřena bezdefektnost svaru, avšak jeho výztužný vliv nebyl uvažován. V první fázi výpočtu byla přezkoumána vzájemná interakce obou vad a bylo potvrzeno, že je zanedbatelná. Pro nebezpečnější defekt V96-1/2 byl vytvořen nový model, který byl analyzován MKP v rozsahu tlaků $p \in \langle 0; 15 \rangle$ MPa. Výpočty napjatostí vad dle MKP-FEM211 v elastické a elastoplastické oblasti ukazují, že při běžném (6.5 MPa) i max. provozním tlaku (7.5 MPa) nevznikají stavy napjatosti a plastického přetvoření, které by měly za následek vznik mezního stavu porušení. Uvedené korozní vady byly rovněž hodnoceny dle standardů ANSI/ASME: B31.G, modifikovaného B31G a určena zbytková životnost metodami lomové mechaniky dle programu RSTRENG.

Srovnání výsledků dle standardů ASME a postupů vyvinutých naší katedrou lze názorně provést pomocí vhodných grafů. Na obr.4 jsou uvedeny grafy křivek reprezentujících mezní rozměry (max. délka a hloubka) vad dle základního a modifikovaného kritéria B31.G a analogické mezní

**Připustné a mezní délky defektů podle kritérií ANSI/ASME
a podle experimentů FS ČVUT**



Obr. 4: graf mezních křivek

křivky ČVUT-A a ČVUT-B, které vycházejí z teoretické a experimentální analýzy korozních vad realizované katedrou pružnosti a pevnosti, FS, ČVUT. Tyto křivky reprezentují výsledky výpočtů MKP ověřené četnými experimenty potrubí s plošnými¹ vadami do destrukce. Křivka ČVUT-B odpovídá mezím stavů, kdy zeslabení stěny trubky a tvar defektu vyvolá v průběhu destrukce zkoušky plastickou deformaci pouze v oblasti vady. Křivka ČVUT-A reprezentuje mezní stavy takových vad na povrchu potrubí, u nichž dochází k porušení po předchozím rozsáhlém plastickém tečení celé trubky.

Uvedení poloh přirozených korozních vad do grafů mezních křivek na obr.4 není zdaleka tak jednoduchou záležitostí, jak to činí ANSI/ASME. Jejich skutečná (efektivní) délka se určuje obtížně. Křivky ČVUT-A, resp. ČVUT-B, se určují na základě výpočtu, resp. experimentálního stanovení, jisté hodnoty mezního tlaku, jímž jsou pak přiřazeny dvě hlavní dimenze: délka a poměrná hloubka defektu. Tímto způsobem se definují křivky pro determinované vady. U přirozených korozních vad ztrácí toto přiřazení těsnou korelaci vzhledem k náhodnosti jejich reliéfu. Bezpečnost těchto vad lze hodnotit porovnáním mezního (destrukčního) tlaku vad vzhledem k tlakům odpovídajícím křivkám ČVUT-A, resp. ČVUT-B, nebo přímým vztahem k max. provoznímu tlaku. Do grafu na obr.4 jsou vyneseny vady z tabulky 1:

Zhodnocení zbytkové pevnosti vad:

- Vady V94-12/1, V94-12/2, V94-12/1M a V94-12/2M:
 - **Podle standardů ANSI/ASME** jsou všechny tyto vady hodnoceny jako extrémní a standard předepisuje snížení provozního tlaku na 50%. Dále hodnotí vady V94-12/1, resp. V94-12/1M, které mají charakter sblužky důlkových vad, jako nebezpečnější, což odporovalo výpočtům dle MVMT i experimentálnímu zjištění.
 - **Podle výpočtu MVMT** se jako nebezpečnější jeví vady V94-12/2, resp. V94-12/2M, které mají pásový charakter, než vady V94-12/1, resp. V94-12/1M, jejichž poloha na grafu mezních křivek je posunuta v nepříznivém směru. Pro mezní tlak,

¹ U vad V96-1/1 a V96-1/2 výrazně převládá rozměr ve směru osy trubky a proto je lze spíše považovat za vady liniové mající diskontinuální charakter.

Vada	délka defektu [mm]	poměrná hloubka defektu [1]
Vady dle obr.1		
V94-12/1	629	0.62
V94-12/2	430	0.39
V94-12/1M	629	0.80
V94-12/2M	430	0.57
Vady dle obr.2 (vlevo)		
V95-9/1/AA	465	0.37
V95-9/1/BB	360	0.42
Vady dle obr.2 (vpravo)		
V96-1/1	110	0.35
V96-1/2	113	0.42
V96-1/1 + V96-1/2	313	0.42

Tabulka 1: Délky a poměrné hloubky defektů.

který byl experimentálně stanoven na 13.4 MPa (výpočtově na 13 MPa), byla určující zeslabená pásová vada V94-12/2M. Tento výsledek potvrzuje nejen značnou konzervativnost standardů ANSI/ASME, nýbrž i nebezpečí nesprávné klasifikace vad podle jejich únosnosti.

- Vady V95-9/1/AA: V95-9/1/BB:

Podle standardů ANSI/ASME by celková vada vyznačená v levém poli na obr.2, s celkovou délkou 865 mm naprosto nevyhovovala, neboť se obraz vady v diagramu na obr.4 dostává mimo reálné pásmo všech mezních křivek. Přitom experiment i výpočet dle MVMT prokázal, že tato vada není nebezpečná. Jestliže vadu rozdělíme na dvě části AA a BB (obr.3) (což je oprávněné na základě existence můstku, který obě vady spojuje, a jehož šířka splňuje hlediska ANSI/ASME, neboť přesahuje trojnásobek tloušťky stěny), pak se tyto vady blíží mezní křivce ČVUT-A.

Podle výpočtu MVMT byl stanoven destrukční tlak v této vadě na 11 MPa, což velmi dobře koresponduje s experimentálně zjištěnou hodnotou $p_{dstr} = 11,3 \text{ MPa}$. Vzátaženo k max. provoznímu tlaku 7.5 MPa, vychází tlaková rezerva $k = 11/7,5 = 1,87$.

- Vady V96-1/1: V96-1/2: V96-1/1 + V96-1/2:

Podle standardů ANSI/ASME samostatné vady V96-1/1, V96-1/2 vyhoví modifikovanému kritériu B31.G, které je méně konzervativní oproti B31.G. Sumární vada je mimo dovolenou oblast podle obou alternativ B31.G.

Podle výpočtu MVMT určená redukovaná napětí potvrzují, že i při velmi vysokých tlacích až 15 MPa je koncentrace napětí lokalizována v nehlubší oblasti poruch. S tím souvisí rozsah "vyboulení" vady (tedy rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším bodem na vnějším povrchu deformovaného pláště), který je pro hodnocení nebezpečnosti defektu rozhodující. Toto převýšení se pohybuje při tlaku 15 MPa na úrovni 0.95 mm. Poněvadž nenastává taková změna v průběhu radiálních deformací, kterou by bylo možno považovat za počátek nestabilního šíření plastické deformace, lze konstatovat, že analyzovaný defekt má pro provozní tlak 7.5 MPa dostatečnou bezpečnost.

Závěr

Mezní křivky dle standardů ANSI/ASME, uvedené na obr.4, vycházejí z předpokladu chování korozních vad jako diskontinuítních porušení stěny potrubí, a tudíž jako základní a rozhodující pro stanovení mezních dimenzí jsou dostačující dva rozměrové parametry vad (délka ve směru osy trubky a max. hloubka). Mezní křivky ČVUT-A a ČVUT-B, získané na základě výpočtů mezní únosnosti determinovaných vad dle MVT a verifikované experimenty, byly z důvodu porovnání vyneseny rovněž v závislosti na délce ve směru osy trubky a max. hloubce, avšak podle analýzy ČVUT byla uvažována, na rozdíl od přístupu ANSI/ASME, skutečná geometrie plošného korozního defektu a přesnější popis chování materiálu. Hodnocení přirozených vad při použití MVT prokazuje, že uvažování skutečné geometrie a materiálu poskytuje výsledky, které odpovídají těsněji experimentálně zjištěným mezním stavům.

Literatura

- [1] F. Valenta, J. Michalec, M. Sochor, M. Růžicka a M. Španiel. Posouzení podélných korozních vad temelů. Technická zpráva 211-96-1, Strojní fakulta ČVUT, Praha, 1996.
- [2] F. Valenta, J. Michalec, M. Sochor, M. Růžicka a M. Španiel. Remaining strength of corroded transit gas pipelines. Workshop'96 Tech. report, CTU, Fac. of Mechanical Engineering, 1996.
- [3] F. Valenta, J. Michalec, M. Sochor, J. Řezníček, M. Růžicka, S. Konvičková, M. Španiel a F. Čermák. Teoretická a experimentální analýza napjatosti v reálných korozních vadách tranzitních plynovodů. Technická zpráva 211-94-12, Strojní fakulta ČVUT, Praha, 1994.
- [4] F. Valenta, J. Michalec, M. Sochor, J. Řezníček, M. Růžicka, S. Konvičková, M. Španiel a P. Štěrba. Residuální pevnost potrubí s pásovitými korozními vadami. Technická zpráva 211-95-9, Strojní fakulta ČVUT, Praha, 1995.
- [5] F. Valenta, M. Sochor, J. Michalec, M. Španiel, M. Růžicka and V. Halamka. Theoretical and experimental evaluation of the limit state of transit gas pipelines having corrosion defects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 66:187–198, 1996. ISSN 0308-0161/96.

Prof. Ing. František Valenta, CSc.
České vysoké učení technické, Praha
Fakulta strojní, Katedra pružnosti a pevnosti
Technická 4, 166 07, Praha 6
Tel.:(02) 2 435 2518