

## EVALUATION CRITERIA OF PIPELINE'S BURST PRESSURE

C. Novotný\*, M. Španiel\*

**Summary:** *This paper is aimed at the problem of limit load carrying capacity of pipeline damaged by surface corrosion defects. Burst (limit) pressure is predicted using methodology developed at CTU Prag. This methodology is based on experimental data and FEM computation of plastic area of pipeline with surface defect. There are presented partial results of FEM recomputation to give a precision for this methodology. This research will continued by recalibration of this criterion.*

### 1. Úvod

Předkládaný příspěvek shrnuje výsledky výzkumu v oblasti určování mezního tlaku korozně poškozeného potrubí plynovodu. Při provozování dálkových potrubních systémů vzniká potřeba hodnotit poškození potrubí a navrhnout opatření pro zajištění bezpečného provozu. Mezinárodně uznávané standardy kategorizují různé druhy poškození a předkládají způsoby jejich identifikace. Jejich součástí jsou metodiky pro hodnocení přípustnosti vad. Jedním z druhů poškození je plošný úbytek materiálu na povrchu potrubí vlivem koroze. Dochází zde, na rozdíl od ostrých poškození typu trhliny či diskontinuity, k destrukci v důsledku plastického hroucení v rozsáhlých oblastech stěny potrubí. Materiál má sníženou schopnost vytvářet přírůsteky vnitřních sil jako odezvu na deformaci.

### 2. Hodnocení nebezpečnosti poškození potrubí

Nebezpečnost poškození je hodnocena porovnáním mezního (destrukčního) a provozního (nominálního) tlaku media. Přesným, ale také nákladným způsobem zjišťování mezního tlaku, při kterém dojde k porušení poškozeného potrubí, je metodika založená jen na experimentálním přístupu. Mezní tlak je zjišťován destrukčními zkouškami potrubí s korozními vadami. Vzhledem k velké variabilitě rozsahu a konfigurací plošných poškození je obtížné založit vyhodnocování mezního tlaku jen na tomto přístupu. Proto jsou užívána kritéria kombinovaná.

V současnosti používané metodiky predikce mezního tlaku lze rozdělit na dvě kategorie:

1. **metodiky založené na analytickém přístupu** - vycházejí z analyticky řešitelných fyzikálních modelů s minimálním počtem parametrů. Operují se zjednodušenou geometrií korozních defektů. Materiálové vlastnosti jsou kromě elastických konstant obvykle popsány mezi kluzu a mezi pevnosti. Hodnotící kritéria jsou naladěna pomocí experimentů. Typickým představitelem těchto modelů je kritérium normy ANSI/

---

\* Ing. Ctirad Novotný, Ing. Miroslav Španiel, CSc.: Ústav mechaniky, Fakulta strojní, ČVUT v Praze; Technická 4; 166 07 Praha 6; tel.: +420.224 352 561, fax.: +420.233 322 482; e-mail: [novotny@biomed.fsfd.cvut.cz](mailto:novotny@biomed.fsfd.cvut.cz)

ASME B31.8 (zkráceně nazývané kritérium B31.G). Základní rovnice kritéria jsou založeny na semiempirické lomové mechanice, vycházejí z pojetí houževnatého porušení potrubí.

2. **metodiky založené na numerickém přístupu** - vycházejí z podrobného geometrického modelování konkrétních defektů metodou konečných prvků. Materiál je popsán některým z inkrementálních modelů elasticko-plastických vlastností. Vstupem je kromě elastických konstant také pracovní diagram materiálu. Výpočtem je modelováno zatěžování poškozené části potrubí tlakem média.

Hlavní výhodou metodik založených na analytickém přístupu je jejich jednoduchost. Jsou nenáročné na geometrické i materiálové vstupní parametry, nevyžadují výkonou výpočetní techniku a programy. Posouzení bezpečnosti je rychlé. Jako každý normovaný předpis však dávají i tato kritéria konzervativní výsledky, a to zejména při aplikaci na rozsáhlé plošné defekty a materiál s velkou schopností plastické deformace. Naproti tomu metodiky založené na numerickém přístupu vyžadují získání přesnějších podkladů o geometrii defektů i chování materiálu potrubí. Jejich výhodou je i větší přesnost predikce.

### 3. Metodika výpočtu mezního tlaku ČVUT (MVMT)

Naše pracoviště se zabývá vývojem metodiky stanovení mezního tlaku s využitím výpočtu MKP od počátku devadesátých let minulého století. Základem předkládaného přístupu - metodiky výpočtu mezního tlaku *MVMT* (Valenta et al., 1996) - je hypotéza, že o mezním stavu plastické únosnosti potrubí v místě plošného ztenčení stěny rozhoduje rozložení plastické deformace. Geometrie plastické oblasti v závislosti na tlaku je určována výpočtem metodou konečných prvků (MKP) a konfrontována s destrukčními experimenty. Pro sérii experimentů jsou takto získány geometrie plastické oblasti při destrukčním tlaku. Na základě těchto experimentů bylo navrženo kritérium pro hodnocení plastické oblasti z hlediska dosažení mezního stavu. To umožňuje stanovit mezní tlak odpovídající reálnému defektu na reálném potrubí s využitím MKP výpočtu plastické oblasti pro rostoucí poslušnost tlaků média prostou kontrolou, pro jaký tlak je toto kritérium poprvé splněno.

### 4. Revokace podkladů pro MVMT

Přesnost metodiky MVMT je negativně ovlivněna faktem, že podklady byly získávány během celého výše zmíněného desetiletí. Zatímco relevance experimentálně získaných podkladů zůstává prakticky neměnná, došlo během uvedeného období ke značnému pokroku jak v hardwarovém, tak i v softwarovém vybavení při MKP výpočtech. Původní výpočty byly prováděny na systému FEM 211, který byl naprogramován na katedře pružnosti a pevnosti FS ČVUT počátkem devadesátých let. Slabinou programu je implementace v MS DOS na PC. Přejít od tohoto systému ke komerčnímu programu ABAQUS firmy Abaqus, Inc. (dříve HKS) umožnil vytvářet podstatně podrobnější a přesnější modely. Nicméně, mezní parametry získané na starších MKP modelech nejsou plně srovnatelné s dnešními výpočty. Prvním cílem naší práce je tedy revokovat starší modely defektů, pro které byl experimentálně stanoven mezní tlak  $p_{LIM}^{exp}$  a provést znovu MKP výpočty systémem ABAQUS na srovnatelně husté síti. Ze šesti takovýchto případů bude provedena recalibrace stávající MVMT. Dalším cílem je implementovat v modelech sledování vývoje energetických parametrů procesu zatěžování trubky (např. energie, resp. hustoty energie dissipované plastickou deformací). Tyto

parametry by mohly nahradit plastickou oblast, jejíž nevýhodou je komplikované zpracování vypočtených dat.

Předkládaná práce se týká první etapy uvedeného výzkumu - vytipování čtyř vhodných defektů, vytvoření nových modelů a provedení MKP výpočtů včetně vyhodnocení plastických oblastí. Pro revokované výpočty byly z databáze vybrány čtyři defekty na trubkách DN 800 s experimentálně zjištěnou hodnotou destrukčního tlaku. Tyto defekty byly měřeny a numericky analyzovány v první polovině devadesátých let minulého století. Všechny vybrané defekty byly uměle vyrobeny vybroušením nebo vyfrézováním do nepoškozené stěny zkušební tělesa. Před vlastním experimentem byly na význačných místech ve všech defektech instalovány tenzometrické snímače. Zkušební těleso bylo poté tlakováno až do destrukce. Jako tlakové médium byla použita voda. Při tlakování byl zaznamenáván tlak média a poměrná prodloužení na tenzometrických snímačích. Kapacita tehdejšího MKP systému spolu s výkonem tehdejších počítačů dovozovala použít řádově stovky až tisíce elementů. Předmětem této studie je vytvoření nových MKP modelů uvedených defektů, jejich analýza a základní zpracování vypočtených dat.

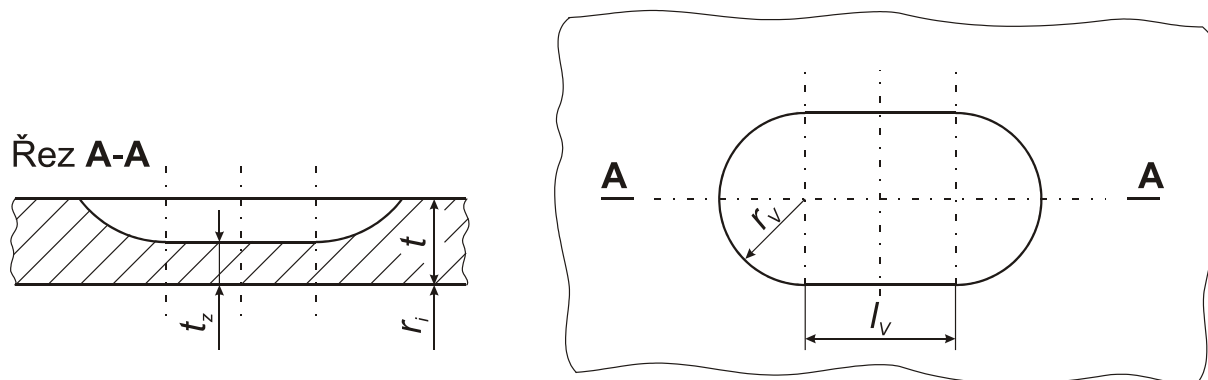
## 5. Numerické modelování

Při MKP simulaci chování potrubí s defektem se modeluje segment potrubí ohraničený dvěma rovinami procházejícími osou trubky (vymezujícími boky segmentu) a dvěma rovinami na osu trubky kolmými (vymezujícími čela defektu). Je-li segment ve srovnání s defektem dostatečně rozlehlý a nepřibližuje-li se defekt k okrajům segmentu, lze podle Saint-Venantova principu předpokládat, že mimo ovlivněnou oblast bude napjatost na segmentu přibližně stejná, jako napjatost na neporušené trubce. Zbytek trubky je na segmentu modelován zavedením symetrických okrajových podmínek. Uzly na bocích segmentu jsou vázány ke svým definičním rovinám. Jedno čelo je uloženo analogicky tak, že jeho uzly jsou vázány k definiční rovině, druhé čelo je zatíženo osovým tahem  $\sigma_0$  dle teorie silnostěnných nádob. Schéma modelových defektů je na obr.1 a geometrické parametry defektů jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka1 Základní parametry analyzovaných defektů

Defekt	Parametry defektu			Parametry trubky		Materiál	$P_{LIM}^{exp}$ [MPa]
	$r_v$ [mm]	$l_v$ [mm]	$t_z$ [mm]	$r_i$ [mm]	$t$ [mm]		
A	70	160	5,1	410	10,6	X60	11,73
B	90	160	6,1	410	11,6	X60	14,40
C	90	160	3,7	410	11,6	X60	9,50
D	90	160	5,5	410	11,6	X60	11,72

Všechny výpočty byly provedeny MKP aparátem ABAQUS (verze ABAQUS 5.8 firmy ABAQUS Inc.) na počítači Origin 2000 Silicon Graphics. Řízení výpočtu bylo naprogramováno tak, aby výsledky byly vypisovány pro předem zvolené tlaky média. U každého defektu byl do množiny těchto tlaků zahrnut tlak destrukční.



Obr.1 Schéma modelových defektů

## 6. Vyhodnocení výpočtů

Z posloupnosti polí posuvu, deformací, napjatosti a akumulované intenzity plastických deformací pro jednotlivé výpočtové tlaky byly vyhodnoceny dle metodiky MVMT mezní tlaky pro jednotlivé řešené případy. Pro srovnání byly vypočteny mezní tlaky dle předpisu B31.G normy ANSI/ ASME. Jednotlivé mezní tlaky určené podle různých přístupů jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka2 Srovnání mezních tlaků zjištěných experimentálně ( $p_{LIM}^{exp}$ ), dle kriteria B31.G ( $p_{LIM}^{B31.G}$ ) a metodiky MVMT ( $p_{LIM}^{MVMT}$ )

Defekt	$p_{LIM}^{exp}$ [MPa]	$p_{LIM}^{B31.G}$ [MPa]	$p_{LIM}^{MVMT}$ [MPa]
A	11,73	8,40	12,48 - 12,92
B	14,40	9,41	13,80 - 14,50
C	9,50	7,88	8,70 - 9,00
D	11,72	9,04	11,40 - 11,90

## 7. Závěr

Vzhledem k tomu, že tento příspěvek reprezentuje dílčí etapu výzkumu spočívající v získání podkladů pro recalibraci metodiky MVMT, nelze vyslovit konečné závěry. V této první etapě byly analyzovány čtyři umělé defekty, jejichž experimentální analýza byla provedena v první polovině devadesátých let minulého století. Výsledky těchto výpočtů byly zpracovány podle stávající metodiky MVMT tak, že budou moci být v následující etapě, spolu s dalšími dvěmi analýzami, použity k její recalibraci. V průběhu výpočtu byla ukládána také data o energii dissipované plastickou deformací, která budou využita při hledání technicky jednodušší formule kritéria mezního stavu.

Je plánována revokace dalších dvou defektů a provedení recalibrace stávajících mezních parametrů defektu. Současně budou výsledky využity pro ověření možnosti nahradit MVMT srovnatelně přesným přístupem založeným na energii dissipované plastickou deformací, který by byl snadněji technicky realizovatelný a algoritimizovatelný.

## 8. Poděkování

Tato práce vznikla ve spolupráci s firmou Transgas a.s. – jedním z nejvýznamnějších přepravců zemního plynu v Evropě.



## 9. Literatura

- Kiefner, J. & Vieth, P. (1990) *New method corrects criterion for evaluating corroded pipe*. Oil and Gas Journal, 88, 32, pp.56-59.
- Španiel, M. & Novotný, C. (2002) *Stanovení podkladů pro zpřesnění metodiky výpočtu mezního tlaku potrubí s plošným defektem*. Technical report 2051/02/20, ČVUT v Praze.
- Valenta, F., Sochor, M., Španiel, M., Michalec, J., Růžička, M. & Halamka, V. (1996) *Theoretical and experimental evaluation of the limit state of transit gas pipelines having corrosion defects*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 66, pp.187-198.