

DETERMINATION OF LIMIT PRESSURE OF PIPELINE WITH DEFECT BY ENERGETIC CRITERION

C. Novotný*, M. Španiel*

Summary: *There is presented criterion design for determination of limit pressure of pipe with surface corrosion defects. In contrast to sharp damage destruction of pipe with surface defects is in consequence of plastic collapse in macrovolume of pipe wall. There is mentioned existent CTU methodology based on evaluation of plastic region during loading by pressure. Newly suggested criterion is based on analysis of energy balance parameters. Work done to pipe body by pressure load and energy dissipated by plasticity are monitored. This approach is under development.*

1. Úvod

Jedním z možných druhů poškození potrubí provozovaných plynovodů je plošná povrchová koroze. Má zvláštní význam jak z hlediska příčin, tak z hlediska prevence. Na základě dosavadního výzkumu se ukazuje, že na rozdíl od ostrých poškození typu trhliny či diskontinuity dochází u plošných defektů k destrukci potrubí v důsledku plastického hroucení v rozsáhlých oblastech stěny potrubí. V důsledku poruchy tloušťky stěny je narušen membránový stav napjatosti v potrubí. Při narůstání tlaku média vedou přídatná ohybová napětí k vytváření „liniového“ plastického kloubu, který obklopuje defekt. Ohybové změkčení stěny způsobuje její „boulení“. Narůstání a přerozdělování plastické deformace je v této etapě omezeno jen na oblast danou zmíněným plastickým kloubem. Pokud je defekt dostatečně velký a hluboký, může dojít k proplastizování celé této oblasti a ke ztrátě stability ještě před počátkem plastizace okolí s neztenčenou stěnou. Častěji dochází ke zhroucení ve stavu, kdy i neztenčené části potrubí jsou již také v plastickém stavu.

2. Metodiky hodnocení mezního tlaku

Nebezpečnost dané korozní povrchové vady je hodnocena klasickým přístupem spočívajícím v porovnání destrukčního (mezního) a provozního (nominálního) tlaku média. V současnosti používané metodiky predikce mezního tlaku potrubí lze rozdělit do dvou základních skupin:

1. Analytické přístupy: Jsou založeny na jednoduchých analyticky řešitelných kritériích. Geometrie defektu je popisována zjednodušeně, materiálové vlastnosti jsou kromě

* 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.fsid.cvut.cz, spaniel@lin.fsid.cvut.cz

elastických konstant obvykle posáány mezí kluzu a mezí pevnosti. Typickými představiteli analytických přístupů jsou kritéria standardů ANSI/ASME a další.

2. Numerické přístupy: Vycházejí z podrobného geometrického modelování konkrétních defektů metodou konečných prvků. Materiál je posán některým z inkrementálních modelů elasticko–plastických vlastností, které kromě elastických konstant zohledňují pracovní diagram materiálu. Výpočtem je modelováno zatěžování potrubí tlakem média. Ke stanovení mezního tlaku lze přistoupit několika způsoby:
 - a. Mezní stav nastane tehdy, překročí-li míra plastizace v jednom místě defektu v celé zbytkové tloušťce stěny mezní hodnotu (Batte et al., 1997).
 - b. Mezní stav je indikován stavovými parametry, které zohledňují nejen míru plastizace, ale také geometrii zplastizované oblasti (Valenta et al., 1996).

Hlavní výhodou analytických přístupů je jejich jednoduchost a obecnost. Jsou nenáročné na geometrické i materiálové vstupní parametry. Posouzení bezpečnosti je rychlé. Je třeba počítat s konzervativním přístupem hodnocení podle standardů. Oproti tomu metodiky založené na numerickém přístupu jsou náročné na získávání podkladů, přípravu modelů i vyhodnocování. Jejich výhodou je větší přesnost závěrů.

3. Dosavadní metoda výpočtu mezního tlaku dle ČVUT

Naše pracoviště se zabývá vývojem metodiky stanovení mezního tlaku s využitím výpočtu MKP od počátku devadesátých let minulého století. Základem stávajícího přístupu – metody výpočtu mezního tlaku ČVUT (Valenta et al., 1996) – je výše zmíněná skutečnost, že vlastnímu porušení potrubí předchází nestabilní rozvoj plastické deformace v okolí poškození. Cílem tedy není najít stav materiálu, ve kterém dochází ke ztrátě integrity, ale stav tělesa s poškozením, při kterém nastává ztráta stability rozvoje plastických deformací. Kritériem dosažení mezního stavu je geometrie zplastizované oblasti. V současnosti je popisována jediným parametrem – poměrnou délkou defektu – jehož mezní hodnota je určena experimentálně. Na základě mechanismu posaného v úvodu je možno stanovit předpoklady použitelnosti tohoto přístupu:

1. Defekt je dostatečně veliký v porovnání s tloušťkou stěny potrubí a má charakter plošné poruchy stěny.
2. Materiál potrubí má velkou zásobu plasticity (tažnost).

K simulaci procesu plastizace při zvyšujícím se tlaku média se využívá metoda konečných prvků. Ta umožňuje řešit kvazistatickou úlohu nelineární geometricky i materiálově.

Podklady o míře plastizace pro posloupnost hodnot tlaku média vypočtené metodou konečných prvků jsou zpracovávány na odpovídající posloupnost hodnot stavového parametru – poměrné délky defektu. Mezní tlak p_{LM} je definován jako tlak, při kterém poměrná délka defektu Λ dosahuje své mezní hodnoty $\Lambda = \Lambda_{LM}$. Poměrná délka defektu Λ je definována jako $\Lambda = \frac{L_p}{L_c}$, kde L_p je délka plastické oblasti a L_c je délka tzv. jádra

defektu. Délka plastické oblasti L_p je určena jako maximální rozměr plastické oblasti ve směru osy potrubí. Plastická oblast je určena jako oblast na povrchu trubky, ve které míra plastizace v celé tloušťce stěny překračuje stanovenou mez akumulované intenzity plastické

deformace ε_{LIM} . Pojem jádra defektu souvisí s vymezením oblasti, ve které probíhá plastizace a její redistribuce. V současném stavu vývoje metodiky je oblast jádra defektu identifikována pomocí pole radiálního posuvu povrchu trubky. Mezní poměrná délka defektu se stanovuje pro experimentálně zjištěné tlaky několika různých umělých defektů. Výsledná hodnota Λ_{LIM} je aritmetickým průměrem mezních poměrných délek jednotlivých defektů. Měřítkem použitelnosti dané metodiky je rozptyl těchto hodnot vyjádřený směrodatnou odchylkou.

4. Návrh alternativní metodiky výpočtu mezního stavu

Z důvodů zmenšení objemu dat potřebných k vyhodnocení mezního tlaku a tím i k urychlení a zjednodušení celého procesu byly hledány alternativní přístupy k výpočtu mezního tlaku. Současně byla sledována větší míra algoritmizovatelnosti vyhodnocování, odstranění lidské práce a zobjektivizování vyhodnocení mezního tlaku. Nově navržená metodika by měla být použitelná u obecných plošných vad.

Na základě dosavadních zkušeností byla věnována pozornost návrhu kritéria založeného na vyhodnocení energetických parametrů určovaných během zatěžování MKP modelu segmentu trubky s defektem. Pokud se zanedbávají dynamické účinky zatěžování tlakem, můžeme zapsat energetickou rovnováhu segmentu trubky v průběhu zatěžování vztahem

$$E^W = E^S + E^P, \quad (1)$$

kde E^W je práce vykonaná vnějšími silami, E^S je vratná energie elastické napjatosti a E^P je energie dissipovaná plastickou deformací.

Východiskem pro návrh alternativní metodiky byl předpoklad, že o mezním stavu rozhoduje velikost objemu, v kterém je dissipována energie plastické deformace. Byl navržen následující postup. Pro vyhodnocovanou vadu je výpočtem MKP získána posloupnost polí měrné energie dissipované plastickou deformací $\{e_i^P\}_{i=1}^n$ v závislosti na tlacích média $\{p_i\}_{i=1}^n$. Pro každý výpočtový tlak p_i je vyhledávána oblast v okolí defektu, ve které je splněna následující podmínka: měrná energie dissipovaná plastickou deformací e^P musí být rovna nebo větší než stanovená mezní hodnota měrné dissipované energie e_{LIM}^P , tj. v celé oblasti musí platit

$$e^P \geq e_{LIM}^P. \quad (2)$$

Je určen objem této oblasti V^P . Tlak, při kterém poprvé objem určené oblasti dosáhne stanovené mezní hodnoty V_{LIM}^P , je mezní tlak. Hodnota mezního objemu V_{LIM}^P je stanovena na základě série destrukčních experimentů trubky s různě velkými plošnými defekty. Pro každý případ je z této série experimentálně určen mezní tlak. Při tomto tlaku je na základě MKP analýzy určena velikost objemu materiálu, kde je splněna energetická podmínka (2). Aritmetickým průměrem hodnot objemů určených pro všechny případy z experimentálně zkoumané série je získána výsledná hodnota mezního objemu V_{LIM}^P a hodnota směrodatné odchylky δ^V . Jelikož velikost tohoto objemu závisí na volbě mezní hodnoty měrné dissipované energie e_{LIM}^P , je mezní objem V_{LIM}^P určován pro zvolený interval hodnot e_{LIM}^P . Je tak získáno několik průměrných hodnot mezního objemu V_{LIM}^P a stejný počet směrodatných

odchylek δ^V . Jako výsledná hodnota mezního objemu V_{LIM}^P je vybrána ta průměrná hodnota, která vykazuje nejmenší směrodatnou odchylku δ^V . V případě, že oblastí splňujících podmínku (2) je více, uvažuje se objem největší z nich. Při ověřování tohoto návrhu se ukázala nevhodnost navržení jediného stavového parametru – objemu V^P . Mezní tlak trubky s defektem nezávisí jen na velikosti objemu, v kterém je plastickou deformací dissipována energie. Svůj vliv zde uplatňuje také zbytková tloušťka stěny trubky ve vadě. Proto byly hledány jiné přístupy jak navrhnout přijatelné kritérium.

V současnosti je ověřována možnost sledovat poměr změny energie dissipované plastickou deformací ΔE^P v seegmentu trubky ku změně práce vnějších sil ΔE^W působících na segment. Byl navržen bezrozměrný stavový parametr χ definovaný jako

$$\chi = \frac{\Delta E^P}{\Delta E^W} . \quad (3)$$

Při tlacích blízkých meznímu stavu by mělo v oblasti defektu docházet k výraznému nárůstu dissipované energie E^P a hodnota χ by se měla blížit k jedné. Z dosavadních výsledků pro vybrané umělé plošné vady, uvedených v kapitole 5, lze vyvozovat nadějnost tohoto přístupu.

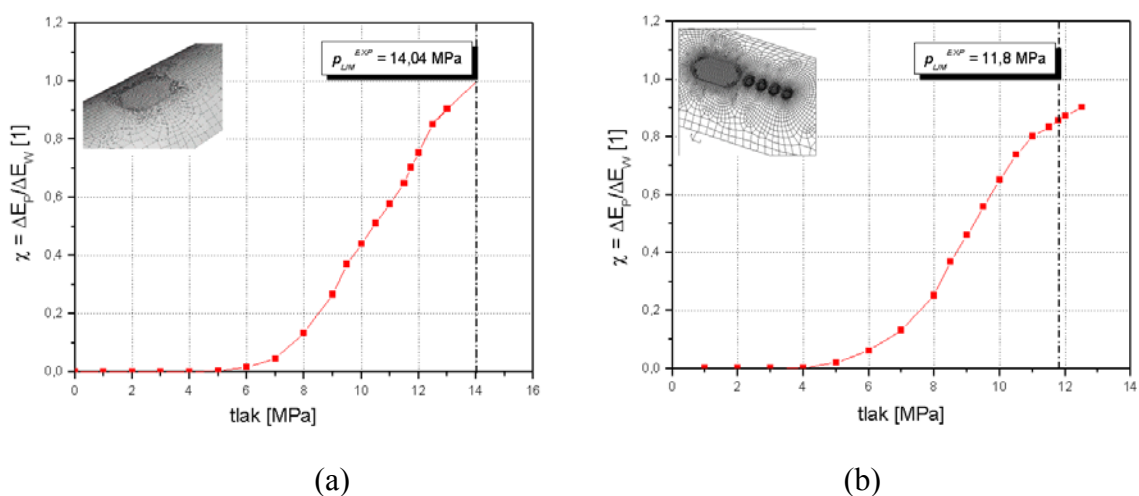
Problémem tohoto přístupu se jeví vliv velikosti řešeného segmentu trubky, pro který jsou určovány energetické parametry. Velikost energie ukládané v objemu trubky mimo vadu by mohla zkreslit lokální nárůst dissipované energie v oblasti vady. Vhodnější by bylo nevyhodnocovat energie (E^W , E^P) z celého defektu ale jen z objemu trubky, kde při daném zatížení dochází k dissipaci plastické energie E^P . Další možností je sledovat rozdíl změn práce vykonané vnějšími silami E^W pro segment trubky s vadou a segment bez vady.

5. Verifikace alternativní metodiky

Nově navržené kritérium je v současné době verifikováno pro plošné umělé i skutečné korozní vady z databáze ČVUT se známými destrukčními tlaky. Výpočtem MKP jsou pro rostoucí posloupnost tlaků média $\{p_i\}_{i=1}^n$ získány posloupnosti polí vratné energie elastické napjatosti $\{\bar{E}_i^S\}_{i=1}^n$ a energie dissipované plastickou deformací $\{\bar{E}_i^P\}_{i=1}^n$ pro jednotlivé elementy MKP modelu. Pro tyto posloupnosti polí energie je určena posloupnost pole práce vykonané vnějšími silami $\{\bar{E}_i^W\}_{i=1}^n$. Součtem jednotlivých elementových hodnot jsou získány posloupnosti energetických hodnot pro celý model – $\{E_i^S\}_{i=1}^n$, $\{E_i^P\}_{i=1}^n$, $\{E_i^W\}_{i=1}^n$. Ze změny těchto hodnot během zatěžování tlakem je dle vztahu (3) určena posloupnost stavového parametru $\{\chi_i\}_{i=2}^n$.

Na obrázku 1 jsou vykresleny závislosti parametru χ na tlaku pro dva vybrané případy umělých vad – oválná vada (a) a skupina oválné vady a čtyř důlků (b).

Analýza objemu trubky z hlediska měrné energie dissipované plastickou deformací, stanovení příslušných oblastí splňující energetickou podmínku a vyčíslení jejich objemů je založena na



Obrázek 1 Závislost parametru χ na tlaku pro oválnou vadu (a) a skupinu oválné vady a čtyř důlkových vad (b) s vyznačeným experimentálně určeným mezním tlakem p_{LIM}^{EXP} .

zpracovávání dat vypočtených přímo v elementech MKP modelu. To zvyšuje algoritmizovatelnost (v porovnání se stávající metodikou) a urychluje zpracování dat stanovených výpočtem MKP. Dále je vyvíjen program, který by nejen určoval oblasti dissipované energie jednotlivé vady, ale také vyhodnocoval objemy dissipované energie u skupiny vad. S pomocí tohoto programu by bylo možno sledovat změny objemů dissipované energie jednotlivých vad ve skupině, jejich případné srůstání v závislosti na tlaku média. Takto by bylo možno vyhodnocovat skupiny vad.

6. Závěr

Mezní tlak je základní parametr při hodnocení poškození potrubí a při stanovení jeho další provozuschopnosti. Příspěvek předkládá další směr ve vývoji metodiky určování mezního tlaku založený na výpočtu MKP. Předkládaná metodika vychází ze sledování energetických parametrů během zatěžování potrubí tlakem. V současnosti probíhá verifikace tohoto přístupu. Pokud se prokáže jeho oprávněnost, bude to znamenat další pokrok ve vyhodnocování mezního tlaku potrubí s plošnými defekty.

7. Literatura

- Batte, D., Bin, Fu, Kirkwood, G.M. & Dan, Vu (1997) Advanced Methods for Integrity Assessment of Corroded Pipelines. British Gas plc. Research Centre, Loughborough, U.K. *Pipes and Pipelines Int.*, Jan-Feb.
- 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. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*. 66, pp.187-1986.