

# INFLUENCE OF SURFACE CORROSION DEFECTS ON LIMIT LOAD CARRYING CAPACITY OF TRANSMISSION GAS PIPELINES

Miroslav Španiel\*, František Valenta†, Milan Růžička‡, Jan Řezníček§,  
Jan Masák¶, Ctirad Novotný||

**Summary:** Results of transit gas pipelines corrosion damage research are presented. Project was supported by grant agency of CR and firm TRANSGAS as continuation of previous research resulting in limit load carrying capacity of pipeline damaged by surface corrosion defect computation methodology (LLCC) [1]. Series consisting of surface defect scanning (including equipment based on optical method), FE-model generation and computation, plastic area postprocessing and limit pressure prediction using LLCC was established and verified via experiments. Our attention was focused on groups of defects laying near each other. When using ANSI/ASME approach there is often important to determine whether evaluate group of pits as one defect, or as single pits or several subgroups. We developed approach based on “bridges” between pits. If bridge is sufficiently small, pits are to be considered as one defect.

**Key words:** pipeline, corrosion damage

## 1 Úvod

Předkládaný příspěvek shrnuje výsledky projektu „Vliv plošných korozních defektů na mezní stav porušení tlakových těles“, který byl realizován v letech 1998 až 2000 za podpory GAČR (106/98/1423) a firmy TRANSGAS s.p. Projekt navazoval na námi navrženou metodiku určování mezního stavu porušení potrubí s rozsáhlými povrchovými korozními vadami, založenou na vyhodnocení rozsahu plastické oblasti v okolí defektu. Podařilo se vytvořit řetězec: sejmutí topologie vady, tvorba modelu MKP, výpočet rozsahu plastické oblasti a predikce mezního stavu porušení. Současně byla verifikována a zpřesňována metodika výpočtu mezního tlaku (MVMT), zejména s ohledem na interakci sousedních defektů. Interakce defektů je velmi závažným vlivem, který je nezbytné akceptovat při použití každé metodiky, včetně mezinárodních standardů ANSI/ASME B31.G. Tři etapy projektu (níže uvedené jako konfigurace A, / a C) poskytují významné závěry pro hodnocení vlivu interakce sousedních defektů oddělených oblastmi s nezměněnou tloušťkou stěny trubky, tzv. můstky.

\*Ing. Miroslav Španiel,CSc., FS ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6; tel. +420 2 2435 2561, e-mail: spaniel@lin.fsid.cvut.cz

†Prof. Ing. František Valenta,CSc., FS ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6; tel. +420 2 2435 2517, e-mail: valenta@fsid.cvut.cz

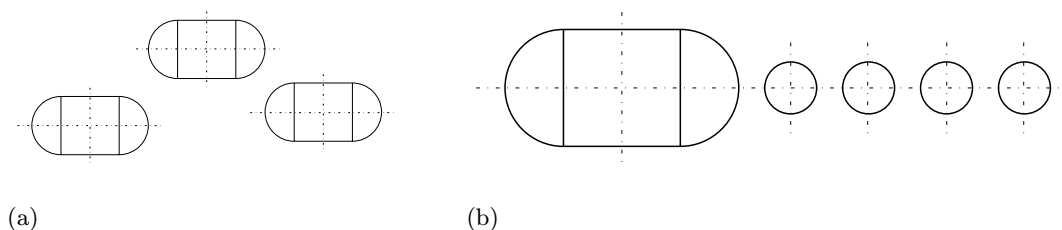
‡Doc. Ing. Milan Růžička,CSc., FS ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6; tel. +420 2 2435 2512, e-mail: ruzicka@fsid.cvut.cz

§Ing. Jan Řezníček,CSc., FS ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6; tel. +420 2 2435 2517, e-mail: reznicek@fsid.cvut.cz

¶Ing. Jan Masák, FS ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6; tel. +420 2 2435 2561, e-mail: masak@u-205.fsid.cvut.cz

||Ing. Ctirad Novotný, FS ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6; tel. +420 2 2435 2561, e-mail: novotnyc@fsid.cvut.cz

Výzkum byl prováděn na podélně svařovaných trubkách DN 800 o nominální tloušťce 10,6 mm, z materiálu X60, na kterých byly vytvořeny umělé vady v několika konfiguracích. Konfigurace A je tvořena třemi oválnými defekty osově i obvodově posunutými (obr. 1(a)). Konfigurace B a C (obr. 1(b)), které sestávají z jedné rozsáhlé oválné vady a čtyř důlků ležících na společné povrchové přímce, se liší pouze ve tvaru důlků. V konfiguraci B jsou důlky ostře zahlabeny, v konfiguraci C mají tvar rotačního paraboloidu. Průměr i hloubka důlků jsou v obou konfiguracích stejné.



Obrázek 1: Schéma modelových defektů v konfiguraci A (a) a B, C (b)

Pro jednotlivé konfigurace A, B, C bylo provedeno:

1. Experimentální zjištění mezního tlaku a analýza napjatosti.
2. Numerické stanovení napjatosti pomocí MKP.
3. Srovnání vypočtených hodnot deformace s hodnotami naměřenými instalovanými tenzometrickými snímači.
4. Posouzení interakce defektů.
5. Stanovení mezního tlaku  $p_{LIM}$ 
  - dle metodiky MVMT ( $p_{LIM}^{MVMT}$ )
  - přímo z MKP modelu ( $p_{LIM}^{Diss.}$ )
  - dle ANSI/ASME ( $p_{LIM}^{ASME}$ )

a jejich srovnání s experimentálně stanoveným mezním tlakem  $p_{LIM}^{EXP}$ .
6. Vyhodnocení koncentrací napětí v můstcích a ve vadách.
7. Srovnání mezního tlaku predikovaného z průběhu dissipované energie v MKP modelu s mezními tlaky stanovenými experimentálně a metodikou MVMT.

## 2 Experimentální analýza

Pro měření deformací v průběhu tlakové zkoušky byly instalovány elektrické odporové tenzometry, převážně sestavené do tenzometrických křížů, jejichž rozmístění bylo stanoveno na základě předběžných výpočtů MKP a prostorových možností. Byly použity samokompenzační odporové tenzometry fy HBM. Zkušební tělesa byla zatěžována přetlakem média  $p$  v několika elastických cyklech (viz [2], [3]) a po té v posledním cyklu až do destrukce. Zkoušky byly prováděny ve SVÚM, a.s.

### 3 Numerická analýza MKP

Numerická analýza stavu napjatosti poskytuje podklady pro stanovení mezního tlaku  $p_{LIM}$  sledované části potrubí s defekty. V rámci prezentovaného výzkumu jsou využívány a ověřovány tři přístupy k výpočtu mezního tlaku.

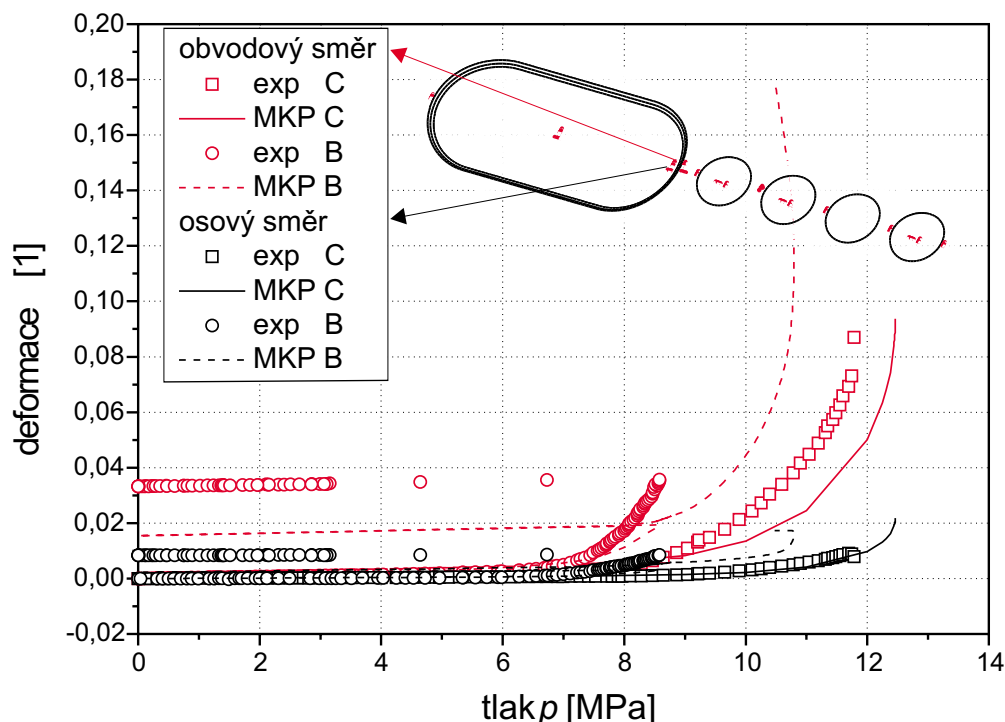
1. **Přístup ANSI/ASME:** Vychází z geometrie poškození a základních materiálových parametrů— $R_e$ , resp.  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$  a tzv. „flow stress“. Při určování mezního tlaku skupiny defektů je třeba rozhodnout, zda jednotlivé vady uvažovat jako samostatné nebo zda považovat celý shluk za jeden defekt. Naše výzkumy ukázaly, že vhodným kritériem při takovém rozhodování je průběh „koncentrace“ napětí nebo plastické deformace mezi jednotlivými důlky, který může být určen výpočtem MKP.
2. **Přístup MVMT:** Metodika pro výpočet mezního stavu potrubí poškozeného plošnou korozní vadou byla vyvinutá na Ústavu mechaniky fakulty strojní ČVUT v Praze, v rámci grantu GAČR 106/95/0869 a je popsána níže.
3. **Přímé určení mezního tlaku** při kvazistatickém zatěžování MKP modelu vychází z představy, že porušení materiálu bezprostředně předchází ztráta stability v důsledku zplastizování rozsáhlých objemů materiálu.

Výpočty jsou s ohledem na rozsah úloh prováděny na segmentu trubky s vadami modelovaném jako 3D–kontinuum. Segment je uložen ve dvou protilehlých stěnách vzniklých řezem rovinou, která prochází osou trubky tak, že uzly v těchto rovinách se nepohybují v obvodovém směru. Dále je uložen na jedné ze dvou stěn vzniklých řezem rovinou kolmou na osu trubky tak, že uzly na tomto řezu se neposouvají v osovém směru. Na vnitřní stěně je kvazistaticky zatěžován tlakem  $p \in \langle 0; p_{max} \rangle$  a na jednom příčném řezu jemu odpovídajícím osovým napětím  $\sigma_o$ . Při analýze jsou zohledněny velké posuvy, rotace a deformace i plasticita materiálu. Materiálová data použitá při numerické analýze jsou stanovena z křivek naměřených na vzorcích odebraných přímo z trubek zkušebních těles. Tahové zkoušky byly prováděny SVÚM a.s. V MKP modelu je použit inkrementální model plastického materiálu se zákonem plastického tečení asociovaným k Misesově ploše plasticity (Prandl-Reussův model s izotropním zpevněním). Všechny výpočty MKP byly provedeny programovým aparátem ABAQUS firmy HKS. Pro tvorbu modelů umělých defektů byla vytvořena makra v programu ANSYS a vyvinut konvertor vstupních dat mezi ANSYSem a ABAQUSEm. Také pro stanovení plastických oblastí a křivek koncentrace napjatosti byl vytvořen programový aparát. Výpočty byly prováděny na počítačích „Origin 2000“ (server FS ČVUT) a na superpočítači „NEC sx 4“ v ČHMU. Pro modelování přirozených defektů bylo v rámci grantu vyvinuto a vyrobeno unikátní snímací zařízení ([3]) a software pro popis geometrie i generování MKP sítě přirozených defektů.

### 4 Srovnávání vypočtených a naměřených hodnot

V rámci řešeného projektu byla prostřednictvím porovnávání naměřených a vypočtených hodnot deformací v místech instalovaných tenzometrických snímačů prováděna verifikace MKP modelů. V oblasti velkých posuvů, rotací i deformací je obtížné stanovit z vypočtených polí deformace ekvivalent poměrného prodloužení, které je měřeno tenzometrem na zkušebním tělese. Proto bylo přistoupeno k modelování tenzometrů konečnými prvky. Podstatou použitého přístupu je využití 1D–tyčových elementů, které v geometricky nelineární variantě generují poměrná prodloužení. Model tenzometru sestává z 10 takovýchto elementů, jejichž 11 uzlů je vázáno ke stěnám elementů modelujících trubku. Průřez asociovaný k elementům MKP modelu tenzometru je volen spolu s materiálovými charakteristikami tak, aby tuhost tenzometru byla zanedbatelná.

Vzhledem ke stejné délce elementů tenzometru lze hodnotu poměrného prodloužení získat prostým aritmetickým průměrem jejich poměrných prodloužení. Obecně lze konstatovat, že shoda vypočtených a naměřených hodnot je přijatelná.



Obrázek 2: Srovnání naměřených a vypočtených závislostí osové a obvodové deformace na tlaku ve vybraném místě pro varianty B a C.

Ačkoli vzhledem ke gradientům křivek při vyšších tlacích by relativní rozdíly naměřených a vypočtených hodnot dosahovaly až 100% je z pohledu na vypočtenou křivku a odměřené body evidentní i druhá interpretace – že totiž „experiment předbíhá výpočet“ a to s chybou podstatně menší (viz obr. 4). Tento efekt nemůže být uspokojivě vysvětlen chybou MKP diskretizace, neboť MKP modely jsou v důsledku diskretizace vždy tužší než spojitě modely v mechanice kontinua. Patrně jde o důsledek anizotropie materiálu, v modelu jsou užity zprůměrované materiálové křivky z osových i obvodových tyčí. Zdrojem chyby může být i samotný model tenzometru, který není modelován jako plastický a jeho tuhost, která je v elastickém stavu vůči tuhosti modelu trubky malá, se může při vysokém stupni plastizace materiálu trubky jevit jako relativně velká.

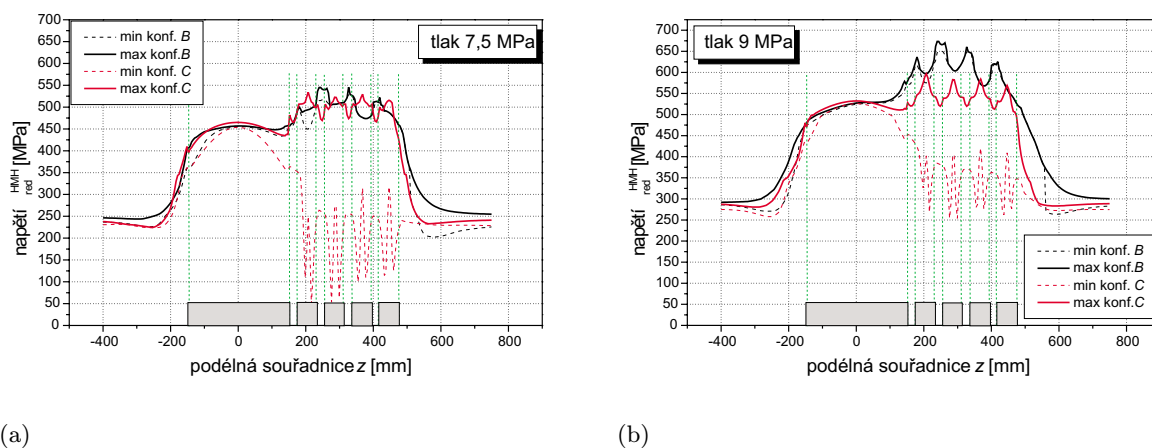
## 5 Vyhodnocení interakce vad

Důležitým cílem řešeného úkolu bylo experimentálně a výpočtově ověřit vliv vzájemné interakce vad na povrchu potrubí a najít vhodné kritérium pro posouzení míry interakce defektů v konkrétních případech. Z praktického hlediska je otázka interakce vad významná zejména proto, že při korozním napadení potrubí vznikají jednotlivé korozní důlky i celá jejich seskupení, která se vzájemně ovlivňují a tvoří plošnou vadu. Mezi těmito poškozeními se vytvářejí oblasti s neztenčenou stěnou, tzv. můstky. Můstky vznikají jak v osovém, tak v obvodovém směru. Při stanovení mezního tlaku reálné plošné vady tvořené shluky korozních důlků podle kritérií ANSI/ASME hraje významnou roli, zda je vada interpretována jako celek nebo zda je rozčleněna na několik útvarů vyhodnocovaných samostatně. Interpretace konkrétního poškození z tohoto hlediska závisí na velikosti můstků mezi sousedními korozními důlky. Jedním z výsledků našeho

výzkumu je návrh kritéria pro rozhodování, zda sousední důlky interpretovat jako jedinou vadu nebo zda je můstek mezi nimi odděluje. Toto kritérium vychází z představy, že jednotlivé vady vytvářejí z hlediska deformací a napjatosti na povrchu trubky tvarové koncentrátoři. Při elasto-plastickém stavu napjatosti lze jako vyhodnocovací kritérium namáhání v okolí okrajů vad a na můstcích využít

- průběh redukovaného napětí  $\sigma_{red}^{HMH}$  v okrajích defektů a v můstku.
- průběh intenzity plastické deformace  $\varepsilon_i^{pl}$  v okrajích defektů a v můstku.

V případě, že průběhy nevykazují v plastickém stavu výrazné špičky, je třeba defekty považovat za propojené.



Obrázek 3: Schéma modelových defektů v konfiguraci A (a) a B, C (c)

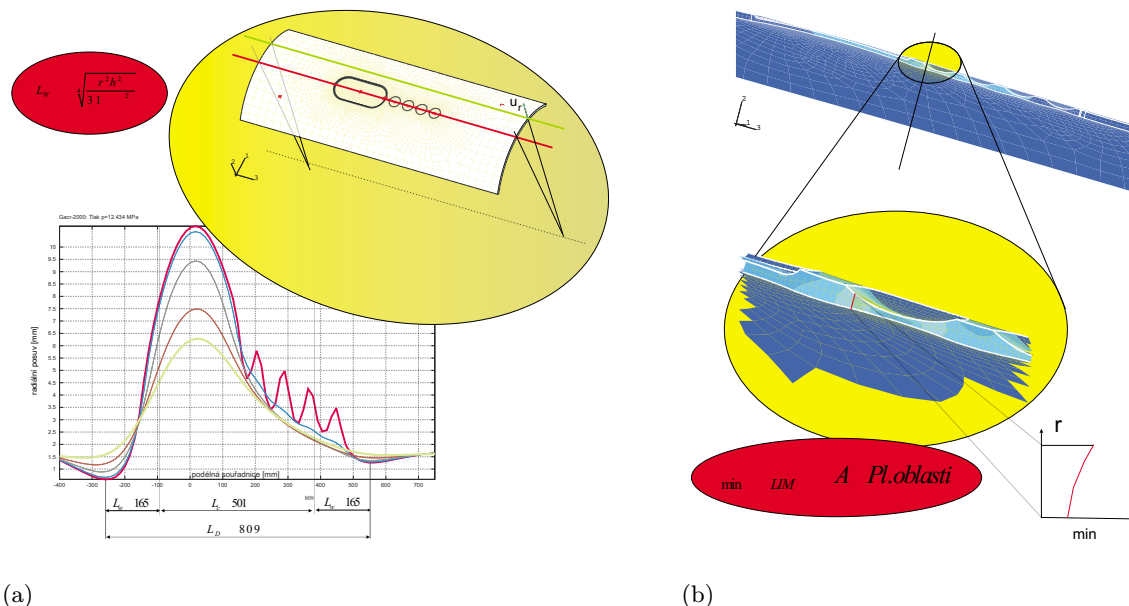
Z provozních zkušeností i z předchozích výzkumů vyplývá, že rozhodující jsou rozměry vad a tedy i šířky můstků ve směru podélné osy potrubí. Konfigurace A, která je navržena tak, že můstky jsou v obecném směru (defekty jsou vzájemně posunuty v osové i obvodovém směru), potvrzuje, že tento případ není nebezpečnější než konfigurace s defekty v jedné ose (B a C). Vzájemné srovnání konfigurací B a C ukazuje vliv tvaru malých korozních důlků na interakci s velkoplošnou vadou. Na obr. 3(a) a 3(b) je porovnání průběhů vypočtených redukovaných napětí podél povrchy v rovině symetrie pro konfigurace B a C. Z průběhů je zřejmé, že

- redukovaná napětí  $\sigma_{red}^{HMH}$  v oválné vadě jsou u obou variant při vyšších tlacích prakticky shodná
- charakter napětí podél důlků je zcela odlišný. U důlků v konfiguraci B je maximálních hodnot redukovaných napětí  $\sigma_{red}^{HMH}$  dosaženo na můstcích, uprostřed důlků je patrný jejich pokles. Naopak u důlků v konfiguraci C je maximálních hodnot  $\sigma_{red}^{HMH}$  dosaženo uprostřed důlků v místě maximální hloubky. Na můstcích byly hodnoty napětí nižší. Svědčí to o významném vlivu tvaru korozních důlků na napjatost a na vzájemné interakce vad. Lze soudit, že konfigurace C měla svým parabolickým tvarem blíže k reálným korozním vadám typu důlkové koroze a že u reálných korozních vad lze očekávat výraznější koncentrace napětí na okraji důlků a zvýšený význam jejich vzájemné interakce.

## 6 Analýza mezního stavu

Predikce mezního tlaku byla prováděna podle metodiky pro výpočet mezního stavu potrubí poškozeného plošnou korozní vadou (MVMT) popsané v [1] a [2] a současně bylo ověřováno přímé

stanovení ztráty stability MKP modelu v oblasti velkých plastických deformací. Metodika pro výpočet mezního stavu potrubí poškozeného plošnou korozní vadou vychází z podrobné analýzy plastizace poškozené oblasti. Vyžaduje detailní znalost geometrie poškození i materiálové křivky potrubí. Podklady o míře plastizace pro posloupnost hodnot tlaku média  $\{p_i\}_{i=1}^N$  vypočtené metodou konečných prvků, jsou hromadně zpracovány speciálními programy na odpovídající posloupnost hodnot stavového parametru–poměrné délky defektu  $\{\Lambda_i\}_{i=1}^N$ . Mezní tlak  $p_{LIM}$  je definován jako tlak, při kterém poměrná délka defektu dosahuje své mezní hodnoty  $\Lambda(p) = \Lambda_{LIM}$ . Poměrná délka defektu je definována jako  $\Lambda(p) = L_P(p)/L_C(p)$ , kde délka jádra defektu



Obrázek 4: Metodika MVMT: definice délky defektu (a) a plastické oblasti (b).

$L_C(p) = L_D(p) - 2L_W$  je podle obr.4(a) dána délkou defektu  $L_D$ , který je z každé strany zmenšen o délku deformační pŕlvlny na rotačně symetricky zatíženém okraji trubky v elastickém stavu  $L_W$ . Délka plastické oblasti  $L_P(p)$  je určena jako osový rozměr (2D) oblasti na povrchu trubky, ve které míra plastizace v celé tloušťce stěny překračuje stanovenou mez  $\varepsilon_{LIM}$ , viz obr.4(b).

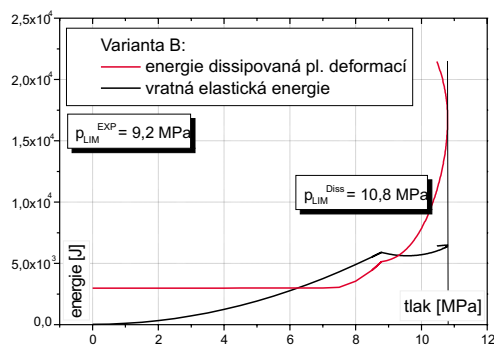
Při přímém stanovení  $p_{LIM}$  byla ověřována možnost najít mezní stav

- jako stacionární bod na zatěžovací křivce metodou délky oblouku
- z průběhu závislosti dissipované deformační energie MKP modelu na tlaku  $p$

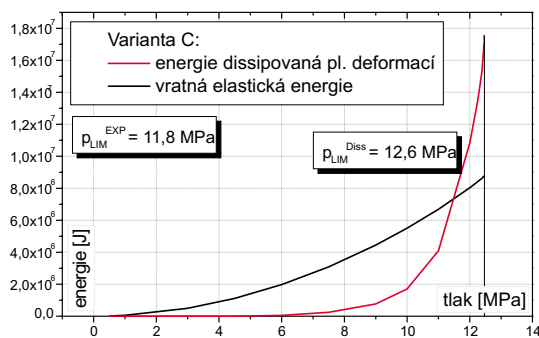
Na obrázcích 5(a), resp. 5(b) jsou vyneseny závislosti energie dissipované a elastické energie akumulované v celém MKP modelu na tlaku pro varianty B, resp. C. Poslední části křivek byly analyzovány metodou délky oblouku (ALM). U varianty B byl výpočtově stanoven stacionární bod při tlaku  $p_{LIM}^{Diss.} = 10,8 \text{ MPa}$ . U varianty C se nepodařilo v přijatelném čase kritický bod stanovit a proto je mezní tlak  $p_{LIM}^{Diss.} = 12,6 \text{ MPa}$  odhadnut na základě velkého spádu křivky v posledním vypočteném tlaku. Přímé stanovení ztráty stability MKP modelu by mohlo po patřičné verifikaci představovat alternativu k MVMT, zajímavou menšími nároky na zpracování vypočtených dat.

## 7 Posouzení dle standardů ANSI/ASME

Plošné vady byly posouzeny rovněž metodikou ANSI/ASME. Výpočty programem RSTRENG podle tří kritérií (Metoda efektivní plochy (effective area method), RSTRENG (0,85



(a)



(b)

Obrázek 5: Metodika MVMT: definice délky defektu (a) a plastické oblasti (b).

dL) a ANSI/ASME (B31.G kritérium) a pro pět konfigurací vad umožnily posoudit možnost uvažovat rozsáhlou korozní vadu rozdělenou na menší, samostatně posuzovatelné defekty. Získané výsledky, ve srovnání s experimentálně zjištěným tlakem, potvrdily konzervativnost norem ANSI/ASME a nutnost vývoje a aplikace námi vyvíjených kritérií. Výsledky vypočtených destrukčních tlaků všech variant výpočtu podle tří uvažovaných kritérií jsou uvedeny v tabulce 1.

| Konfigurace | Effective area method | RSTRENG 0.85dL | Modified B.31G criteria |
|-------------|-----------------------|----------------|-------------------------|
|             | 13,309                | 12,445         | 12,462                  |
|             | 10,853                | 7,858          | 9,073                   |
|             | 10,324                | 7,072          | 8,439                   |
|             | 9,095                 | 9,940          | 10,440                  |
|             | 6,505                 | 6,318          | 3,688                   |

Tabulka 1: Predikce destrukčních tlaků v [MPa] podle kritérií ANSI/ASME pro konfiguraci C. Experimentálně stanovený tlak pro tuto konfiguraci je  $p_{LIM}^{EXP} = 11,8$  MPa.

## 8 Závěry

Z realizace uskutečněných výzkumných prací byly vyvozeny následující závěry:

1. K verifikaci numerických postupů (s použitím nelineární MKP) a mezinárodních standardizovaných postupů (ANSI/ASME) byly získány podklady z destrukčních hydrostatických zkoušek těles potrubí. K iniciaci trhlin docházelo v místech, kde byly experimentální tenzometrickou a numerickou analýzou pomocí MKP určeny nejvyšší koncentrace plastické deformace.
2. Byl navržen originální přístup k modelování tenzometrů MKP. Výpočty velikosti poměrných prodloužení v porovnání s experimentálně určenými hodnotami vykázaly uspokojivou shodu. Aspekt tuhosti MKP modelu tenzometru bude podroben kvantitativnímu zkoumání s použitím numerických experimentů.

3. Predikce mezního tlaku byla prováděna podle metodiky pro výpočet mezního stavu (MVMT) popsané v [1] a [2]. Byla navržena alternativní metoda predikce mezního tlaku podle průběhu energie disipované plastickou deformací v celém MKP modelu. Verifikace tohoto přístupu nebyla dosud ukončena, ale pravděpodobnost oprávněnosti tohoto méně náročného postupu je poměrně vysoká.
4. Byly srovnány výsledky numerické analýzy segmentu potrubí - konfigurace oválné vady se skupinou ostře zahluobených důlků (*B*) a konfigurace oválné vady se skupinou důlků s tvarem rotačního paraboloidu (*C*). Z porovnání výpočtů MKP je patrný značný vliv geometrie důlků na rozložení napětí v blízkém okolí. Pro ostře zahluobené důlky je napětí  $\sigma_{red}^{HMH}$  po tloušťce stěny téměř shodné. Naopak u důlků parabolických jsou po tloušťce stěny značné rozdíly v napětí. Vliv geometrie důlků se projevuje také na poloze a velikosti extrémů napětí. Maximální hodnoty se v konfiguraci *B* nacházejí na můstcích spojujících důlky a v konfiguraci *C* ve střezech důlků (konfigurace s parabolickými důlky). Válcové důlky vykazují větší hodnoty redukovaného napětí nežli důlky parabolické.
5. Plošné vady na zkušebním tělese byly podrobeny posouzení podle metod ANSI/ASME. Byly provedeny výpočty programem RSTRENG a to podle několika kritérií. Potvrzuje se konzervativnost přístupu norem ANSI/ASME. To opravňuje používání námi vyvíjených kritérií.
6. Vzájemná interakce vad byla dále posuzována z hlediska velikostí součinitelů koncentrace redukovaného napětí a koncentrace tečné deformace.
7. Bylo vyvinuto zařízení pro přesné snímání tvaru povrchu plošných korozních vad poškozeného potrubí přímo v terénu.

## References

- [1] F. Valenta, M. Sochor, M. Španiel, J. Michalec, M. Růžička, 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.
- [2] Valenta F., Španiel M., Růžička M. a další. Vliv plošných korozních defektů na mezní stav porušení tlakových těles. Výzkumná zpráva 2051/99/35 FS ČVUT v Praze (průběžná zpráva GAČR 106/98/1423). Praha 2000
- [3] Valenta F., Španiel M., Růžička M. a další. Vliv plošných korozních defektů na mezní stav porušení tlakových těles. Výzkumná zpráva 2051/01/1 FS ČVUT v Praze (závěrečná zpráva GAČR 106/98/1423). Praha 2001