



Akademie věd České republiky  
**Ústav teoretické a aplikované mechaniky**

Prosecká 76, 190 00 Praha 9

**OPONENTSKÝ POSUDEK**  
doktorské disertační práce

**Hodnocení bezpečnosti a porušování vysokotlakých produktovodů  
s využitím nových teoretických i experimentálních přístupů**

Autor: Ing. Jan KEC (SVÚM a.s.)

Předkládaná disertace se zabývá problematikou změn statické pevnosti i únavové životnosti ocelových trubek v důsledku dlouhodobého působení korozně napěťových trhlin. Jedná se převážně o experimentální výzkum, jehož výsledky mají velký význam při zajištění provozní bezpečnosti vysokotlakých produktovodů, a to zejména plynovodů a ropovodů. Zkušební trubní tělesa s defekty byla zhotovena ze skutečných potrubí, provozovaných až padesát let. Tělesa byla zatěžována vnitřním přetlakem vody tak, aby byly co nejvěrohodněji simulovány provozní podmínky. Při zkouškách bylo studováno zejména chování korozně napěťových trhlin, přítomných ve formě síťoví. Významnou součástí zkoušek byla metoda statického přetížení, která u klasických trhlin únavového původu vede k otupování čela trhlin, ke zvětšení plastické oblasti před čelem trhliny a ke vzniku tlakových napětí po odlehčení. Tímto dochází k určitému zablokování trhliny a tím i ke zvětšení odporu proti jejímu dalšímu růstu. Při cyklickém zatěžování se statické přetížení projeví prodloužením únavové životnosti.

V úvodu uvádí disertant faktory, které ovlivňují bezpečnost a spolehlivost vysokotlakých tranzitních potrubí. Mezi tyto faktory zařazuje materiálové a technologické vlastnosti potrubí, dále provozní podmínky a poškození potrubí z provozu. V úvodu se věnuje i destrukcím plynovodů, ke kterým došlo po celém světě.

Druhá kapitola je věnována přehledu současného stavu poznání. Nejdříve se disertant zabývá vývojem ocelí pro produktovody. Díky rozvoji metalurgických poznatků prošel vývoj ocelí od nízkouhlíkových třídy 11 přes oceli X42, X52, až k ocelím X60, X70, X80 dle API 5L. Disertant podrobněji popisuje postupy vedoucí ke zvýšení meze kluzu, a to cestou řízeného válcování a zrychleného ochlazení vodou z dvoufázové oblasti. U ocelí X60, X70 a X80 byly zvýšeny nejen hodnoty meze kluzu, ale i hodnoty vrubové a lomové houževnatosti, což umožňuje zvýšit tlak plynu, a to i u větších průměrů trubek a dopravovat tak větší množství plynu.

Dalším tématem, kterému se disertant věnuje, je namáhání produktovodů. I přes mírné kolísání tlaku během provozu produktovodů by nedošlo k jejich selhání, pokud by se ve stěně nenacházely ostré koncentrátoři typu trhlin. Protože se však obecně nedá vyloučit přítomnost trhlin ve stěně produktovodu, je nutné zabývat se vlivem trhlin na integritu potrubí. Proto prezentuje disertant v disertaci základní vztahy pro určení napětí před čelem trhliny za použití



faktoru intenzity napětí  $K_I$  a ukazuje tři základní módy zatížení tělesa s trhlinou. Kromě tahového módu je tu ještě rovinný smykový mód a antirovinný smykový kód.

Disertant popisuje únavové šíření trhlin pomocí Parisova vztahu. Uvádí zde i Parisovy závislosti pro oceli X60 a X70 z práce [36], ze kterých vyplývá prakticky stejná rychlost růstu únavových trhlin pro obě oceli, a to od rozkmitu  $\Delta K \approx 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (prahové hodnoty) do  $\Delta K \approx 40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Přitom věnuje pozornost i otevíracímu a zavíracímu napětí, resp. příslušným hodnotám K faktoru při těchto napětích.

Dále se disertant zabývá podmínkami vzniku koroze pod napětím, kde ukazuje, že u zakopaných produktovodů se mohou vyskytnout v podstatě dva typy koroze SCC, a to klasická - při vysokých hodnotách pH faktoru okolní zeminy (označovanou v disertaci jako HpHSCC) a pak koroze vyskytující se při hodnotách faktoru pH  $\sim 5,5 - 7$  (označovanou v disertaci jako NNpHSCC). Toto uvádím proto, že u klasické koroze SCC se setkáváme s trhlinami typu „penny shape“, tedy polokruhovými, zatímco u druhého typu se setkáváme s trhlinami poloeliptickými. Pokud se na obnaženém povrchu potrubí vytvoří galvanický článek, začne se vyvíjet atomární vodík, který je klíčovým faktorem u trhlin NNpHSCC. V další části uvádí disertant vlivy koncentrátorů napětí na korozně napěťové trhliny. Typickým koncentrátorem napětí jsou promáčknutí stěny – denty, jejichž vliv v únavě lze jednoduše popsat tak, že únavová životnost potrubí klesá s hloubkou dentu, zatímco při statickém zatížení potrubí rostoucím vnitřním tlakem média je rozdíl lomového tlaku pro různé hloubky dentu (9, 12, 14, 25 mm) pouze 2%. Dalším koncentrátorem napětí u tlakových potrubí jsou svary. Jedním z kritických míst je pata svaru. Pro toto místo byly zjištěny hodnoty součinitele koncentrace napětí v rozmezí 2,06 – 2,83.

Důležitou částí přehledu současného stavu poznání jsou strategie pro zmírnění vlivu SCC trhlin na integritu potrubí. Jedná se hlavně o přetížení potrubí nad provozní tlak, dále o povrchové NDT a o vnitřní inspekce potrubí. Disertant zde poukazuje na to, že ačkoliv je technika řízeného přetížení známá mnoho desetiletí, tak její pozitivní přínos je přinejmenším diskutabilním.

Ve třetí kapitole definuje disertant cíle disertační práce. Patří sem analýza chování SCC trhlin při únavovém zatížení, posouzení statické pevnosti potrubí po cyklické tlakové zkoušce, dále zhodnocení rychlosti růstu SCC trhlin při únavovém zatížení, zahrnutí svarů do hodnocení chování SCC trhlin a navržení alternativní metodiky pro hodnocení bezpečnosti potrubí s SCC trhlinami. Mohu konstatovat, že disertant všechny stanovené cíle splnil.

Rychlost růstu únavových trhlin byla měřena na vzorcích pro třibodový ohyb se součinitelem asymetrie cyklu  $R = 0,54$ . Tento součinitel byl zvolen záměrně, aby odpovídal napěťové asymetrii při cyklickém zatěžování trubek.

V kapitole 4 popisuje disertant experimentální přípravu zkoušek. Jedná se o potrubní tlaková tělesa, laboratorní vzorky pro tahové zkoušky a vzorky pro zkoušky rázem v ohybu, a dále o metodiku zkoušek a analýz.

Výsledky zkoušek a analýz jsou předmětem páté kapitoly. Z výsledků chemické analýzy vyplývá, že se jedná o nízkouhlíkovou ocel legovanou manganem. Disertant rozebírá vlivy Mn, Si a C na přechodovou teplotu DBTT (ductile-brittle transition temperature), neboť tato teplota je jistým ukazatelem odolnosti oceli proti vzniku křehkých trhlin. Zatímco Mn snižuje



teplotu DBTT a tím prospívá odolnosti proti vzniku křehkých trhlin, Si tuto teplotu zvyšuje. Podobně jako Si působí i uhlík C.

Tahové zkoušky vzorků ukázaly, že hodnoty meze kluzu  $R_{t0,5}$ , meze pevnosti  $R_m$  a tažnosti A vyhovují předepsaným mechanickým vlastnostem pro ocel X60N podle ČSN EN ISO 3183. Zkoušky rázem v ohybu ukázaly, že i nárazová práce  $KV_2$  vyhovuje požadavkům výše uvedené normy. Jako kritérium se zde uvažuje minimální hodnota nárazové práce  $KV_2 = 40$  J v obvodovém směru při teplotě  $0^\circ$  C. Změřená průměrná hodnota při teplotě  $0^\circ$  C byla 58 J. U svaru je požadována minimální nárazová práce 27 J při teplotě  $0^\circ$  C. Tento požadavek normy byl splněn u všech vzorků.

Lomová houževnatost byla určována na jednom 3PB vzorku, kde byl nárůst trhliny měřen pomocí stejnosměrné potenciálové metody během monotónního zatěžování. Ze získané závislosti  $F - \Delta a$  bylo možné určit sílu odpovídající začátku nenulového nárůstu trhliny (použita pak při určování  $J_{in}$ ) a také sílu odpovídající jakémukoliv nárůstu trhliny, tedy např.  $\Delta a = 0,2$  mm, potřebnou pro určení  $J$  integrálu  $J_{0,2}$ . V závislosti  $F - f$  (síla – posuv působíště síly) byly vyznačeny plochy pro určení  $J$  integrálů  $J_{in}$  a  $J_{0,2}$ . Získané hodnoty  $J_{in}$  a  $J_{0,2}$  ukazují na dobrou lomovou houževnatost materiálu trubek i po padesátiletém provozu.

Podobně i odolnost vůči růstu únavových trhlin byla dobrá, o čemž svědčí jak hodnota Parisova mocnitele tak i hodnota Parisovy konstanty. Dále disertant předkládá výsledky mikrostrukturní a metalografické analýzy nalezených trhlin. Všechny trhliny byly zjištěny na vnějším povrchu trubky a byly orientovány kolmo na působení obvodového napětí. Trhliny se během šíření občas větvily, a to bez výraznější strukturní preference.

Důležitou oblast v disertaci tvoří chování SCC trhlin při statickém zatížení a následné cyklické tlakové zkoušce. Bylo testováno 19 potrubních těles a analyzováno 298 SCC trhlin pomocí tenzometrického měření. Hloubky trhlin v ZM se pohybovaly od 1 mm do 4 mm. Testování potrubních těles spočívalo v úvodním statickém zatížení na různé tlakové úrovni, výdrži na tlakové úrovni po dobu od čtvrt hodiny až po dvě hodiny, s následujícím odlehčením na nulu. Poté následovalo cyklické zatěžování odpovídající provoznímu zatěžování: dolní tlak  $p = 4,0$  MPa, horní tlak  $p = 7,35$  MPa. Cyklické zatěžování probíhalo až do dosažení 20 000 cyklů, pokud nedošlo dříve k přílišnému zvýšení deformace (rozevření trhliny na povrchu trubky) během několika málo cyklů. Po cyklickém zatěžování následovalo statické zatížení trubky do lomu.

Toto schéma zatěžování absolvovaly všechny trubky. Z nich ale jen devět bylo vybráno do disertace. Z toho byla tři trubní tělesa před cyklováním zatížena na tlak  $p = 7,35$  MPa (což je i horní úroveň cyklického zatěžování u všech těles), další tři trubní tělesa byla zatížena na tlak  $p = 9,55$  MPa a poslední tři tělesa byla zatížena na tlak  $p = 11,9$  MPa. V první skupině nedošlo u dvou těles během patnáctiminutové výdrže na tlaku 7,35 MPa k žádnému nárůstu deformace (resp. rozevření trhliny), avšak u jednoho tělesa (obr. 5-26) byl zjištěn nárůst deformace  $120 \cdot 10^{-6}$  po patnáctiminutové výdrži. U druhé skupiny trubních těles zatížených na tlak  $p = 9,55$  MPa došlo během dvouhodinové výdrže k nárůstu deformace, a sice  $100 \cdot 10^{-6}$  (obr. 5-16),  $290 \cdot 10^{-6}$  (obr. 5-22) a  $220 \cdot 10^{-6}$  (obr. 5-28). U třetí skupiny trubních těles zatížených na tlak  $p = 11,9$  MPa došlo během hodinové výdrže na tlaku k nárůstu deformace  $1680 \cdot 10^{-6}$  (obr. 5-18),  $1360 \cdot 10^{-6}$  (obr. 5-24) a  $2300 \cdot 10^{-6}$  (obr. 5-30).

Následující cyklování těles ukázalo v souřadnicích „poměrná deformace – počet aplikovaných cyklů“ buď a) relativně stabilní průběh této závislosti s téměř konstantní střední hodnotou deformace – v tomto případě se jednalo o tlak 9,55 MPa a v jednom případě i o tlak 7,35 MPa



– nebo b) průběh s klesající střední hodnotou deformace. Je zřejmé, že takovýto průběh nelze vysvětlit na čistě deformační bázi, jelikož při rekonstrukci hysterezních smyček  $p - \varepsilon$  by se smyčky posouvaly k menším hodnotám  $\varepsilon$ , což možné není. Mohl by se disertant k tomuto problému vyjádřit a předložit možné vysvětlení?

Po skončení cyklického zatěžování trubních těles následovalo statické zatěžování rostoucím vnitřním tlakem až do lomu. Získané hodnoty lomových tlaků byly hodnoceny pomocí tzv. diagramu posouzení lomu (Failure Assessment Diagram), ve kterém se vynáší na osu  $x$  bezrozměrný parametr  $L_r$  a na osu  $y$  bezrozměrný parametr  $K_r$ . Parametr  $L_r$  je dán poměrem aplikovaného napětí  $\sigma$  a napětí  $\sigma_L$  odpovídajícího meznímu zatížení. Parametr  $K_r$  je dán poměrem faktoru intenzity napětí  $K_I$  a elasto-plastické lomové houževnatosti  $K_{EP}$ . U trhlín s hloubkou 1 – 2 mm došlo k porušení při tlacích 1,3 · SMYS, a to plastickým kolapsem. U trhlín s hloubkou 3 – 5 mm bylo porušení lomově-plastické. U hloubek nad 5 mm došlo k porušení při tlacích odpovídajících SMYS. U ještě větších hloubek ležely lomové tlaky pod SMYS. Disertant rozebírá možné příčiny toho, že výsledky v souřadnicích  $L_r - K_r$  se pohybovaly nad křivkou porušení. Domnívám se, že skutečnost, že body porušených těles leží nad křivkou FAD, je v pořádku, protože pod křivkou je bezpečná oblast, kde k lomům nedochází.

Po tlakových zkouškách byly proměřeny geometrie SCC trhlín a bylo uskutečněno hodnocení únavových přírůstků na čele trhlín. Hustota pravděpodobnosti hloubek trhlín odpovídala log-normálnímu rozložení. Analýza poměrů hloubek trhlín k povrchovým délkám ukázala, že nejčastěji ležel tento poměr mezi 0,2 a 0,3 – šlo tedy o semieliptické trhliny.

Disertant dále uskutečnil experimentální hodnocení rychlosti růstu SCC trhlín při únavovém zatěžování, a to tak, že každý jednotlivý přírůstek na čele SCC trhliny přepočtl a vložil do diagramu  $\log(da/dN)$  vs.  $\log(\Delta K)$ . Tím získal body pro tělesa bez přetížení, s přetížením na 1,3 x MAOP a s přetížením na 110% SMYS. Pro porovnání umístil disertant do diagramu ještě i body, získané na standardizovaných tělesech pro třibodový ohyb. To mu umožnilo zkonstruovat Parisovy křivky pro všechny tyto skupiny. Ten samý postup použil disertant i pro SCC trhliny ve svarovém kovu a v tepelně ovlivněné zóně. Zjistil, že rychlost růstu i prahová hodnota SCC trhlín v SK a TOZ byly mnohem nižší než v základním materiálu. Tuto skutečnost vysvětlil tím, že svarový kov omezuje deformace ve svém okolí a tím snižuje rozkmit napětí, který určuje rychlost růstu únavové trhliny.

Jako alternativu k dokumentu CEPA navrhl disertant metodiku pro zmírnění vlivu SCC na základě uskutečněných prací. Tato metodika se opírá o vnitřní inspekci potrubního úseku a o tlakové zkoušky nejhorších úseků potrubí.

#### Připomínky a dotazy:

- mohl by se disertant vyjádřit ke zjištěnému poklesu střední deformace v cyklu po přetížení nad mez kluzu a předložit možné vysvětlení?

- na s.43 disertant uvádí, že hydrotest pozitivně přispívá zejména u nižších hodnot faktoru intenzity napětí k dočasné retardaci růstu trhlín – u vyšších úrovní FIN však dojde k tlakovému „nezdaru“. Mohl by disertant tuto skutečnost komentovat a eventuálně vysvětlit z pozic lomové mechaniky?



- existují tři základní módy zatížení tělesa s trhlinou: tahový, rovinný smykový a antirovinný smykový; disertant v popisu trhlinových defektů označil omylem tento třetí mód jako antismykový mód.

- pokud měl disertant při posuzování 19 ti trubek z oceli X60 od zadavatele i podklady o pH faktoru prostředí, ve kterém se trubky nacházely, zjistil také, že u HpHSCC trhlín se jednalo o trhliny typu „penny shape“, tedy polokruhové a u NNpHSCC trhlín o typ semi-eliptických trhlín ?

- jaký je mechanismus působení vodíku u trhlín HpHSCC ?

- s.78, Obr. 5.24: nesedí záznam z tenzometru; místo  $p = 7,35$  MPa má být  $p = 11,9$  MPa

- s. 88, Obr. 5-39: to, že body porušených těles leží nad křivkou FAD, je v pořádku, protože pod křivkou je bezpečná oblast, kde k lomům nedochází.

- v čem je přínos alternativní metodiky na zmírnění vlivu SCC ve srovnání s metodikou CEPA?

Tyto připomínky nemají za cíl zeslabit vysokou odbornou úroveň disertace, ale jen poukázat na složitost řešené problematiky.

### Celkové hodnocení

Zkoušky materiálu produktovodů po pěti dekadách provozu jsou neocenitelné zejména v tom, že umožňují nahlédnout do procesů jejich degradace během dlouhodobé exploatace v korozním prostředí při působení vnitřního přetlaku přepravovaného média a vnějších zatížení vyvolaných možnými posuvy zeminy. Jednou z příčin degradace materiálu produktovodů jsou korozně napěťové trhliny (SCC), které jsou v ranních stádiích obtížně zjistitelné a mohou proto vést k neočekávaným lomům potrubí. Identifikovat trhliny SCC v tlakovém potrubí a poznat jejich chování během zatížení si vzal za úkol disertant v této své disertační práci. Ačkoliv se jedná o trubky z potrubí provozovaných půl století, výsledky práce disertanta jsou velmi aktuální i dnes, kromě jiného i proto, že nejen ve světě, ale i u nás probíhají práce týkající se postupného přechodu plynovodních soustav od zemního plynu ke směsí zemního plynu s vodíkem, eventuálně až k čistému vodíku. V této souvislosti se jeví žádoucím věnovat zvýšenou pozornost zajištění integrity plynových potrubí, a to s ohledem na nepříznivý vliv vodíku a s ním spojených korozně napěťových trhlín na lomovou houževnatost plynovodních trubek.

Předkládaná disertace je velmi obsažná a její rozdělení do jednotlivých kapitol je logické a i přes velký rozsah (~ 130 stran) ji činí přehlednou a pro čtenáře srozumitelnou.

- Všech pět cílů disertační práce bylo dosaženo.

- Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky je vysoká, o čemž svědčí i vysoký počet použitých publikačních zdrojů.

- Teoretický přínos disertační práce spatřuji hlavně ve vědeckém popisu chování SCC trhlin při zatěžování starších produktovodů. Disertant například zjistil, že přetížení potrubí produktovodu nad horní úroveň cyklického tlaku vede k poškození korozních produktů a k uzavírání trhlin na základě nerovností povrchu, což vede v součtu k retardaci růstu SCC trhlin při únavovém zatěžování a ke zvýšení životnosti.
- Praktický přínos disertační práce vidím ve vypracování alternativní metodiky pro hodnocení integrity dlouhodobě provozovaných produktovodů na základě interních inspekcí potrubních úseků a následných tlakových zkoušek při závažných indikacích trhlin. Tato problematika má pozitivní dopad pro průmysl provozující produktovody.
- Použité metody řešení byly vhodné pro dosažení cílů disertace.
- Použité metody byly aplikovány způsobem, který zajistil získání experimentálních podkladů pro dosažení cílů disertace.
- Doktorand prokázal velmi dobré znalosti v daném oboru.
- Formální úroveň práce je velmi dobrá.
- Vzhledem ke všem uvedeným kladným aspektům posuzované disertace doporučuji, aby byla přijata k obhajobě a aby disertantovi byl udělen titul Ph.D. dle zákona č. 111/1998 Sb.

Praha, 1.12.2023

---

Ing. Lubomír Gajdoš, CSc.  
Ústav teoretické a aplikované  
mechaniky AVČR  
Prosecká 76, Praha 9