



## OPONENTNÍ POSUDEK

*disertační práce*

**Ing. Jan KEC**

### HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI A PORUŠOVÁNÍ VYSOKOTLAKÝCH PRODUKTOVODŮ S VYUŽITÍM NOVÝCH TEORETICKÝCH I EXPERIMENTÁLNÍCH PŘÍSTUPŮ

V Praze dne 10. 11. 2023

Vypracoval: **Prof. Ing. Milan Růžička, CSc.**

---

#### Úvod

K posouzení byla předložena disertační práce Ing. Jana Kece, vypracovaná v rámci doktorského studia na Fakultě strojní ČVUT v Praze ve studijním programu Výrobní a materiálové inženýrství. Práce se zabývá vlivem korozně napěťových trhlin na statickou pevnost a únavovou životnost ocelových trubek po dlouhodobém provozu s cílem zvýšit provozní bezpečnost a spolehlivost provozovaných potrubí. Práce obsahuje 132 stran textu plus přílohy a je rozčleněna do sedmi hlavních kapitol.

#### Význam tématu disertační práce pro obor

Predikce únavové pevnosti a životnosti dílů všeobecně je jedním z hlavních témat řešení při navrhování dílů strojních konstrukcí. Není tomu jinak i při navrhování potrubních systémů plynovodů. Problematika životnosti je o to složitější, že trubky plynovodů jsou provozovány dlouhá léta v zásypu zeminy a materiál je i přes izolace mnohdy vystaven agresivnímu koroznímu prostředí i složitým podmínkám zatížení. Jako začínající pracovník FS ČVUT jsem se věnoval hodnocení spolehlivosti plynových potrubí s výskytem vad (ztenčení tloušťky stěny nebo trhlinami) již počátkem tohoto století, problematika je však aktuální dodnes a to v kontextu nových materiálů, technologií i výpočetní a experimentální techniky.

#### Popis a zhodnocení obsahu práce, použitých metod, postupu řešení a dosažení cílů práce

V následujícím textu bude proveden popis a hodnocení v nadpisu uvedených bodů se zvýrazněním některých doplňkových otázek na autora práce, které by měl objasnit při vlastní obhajobě práce.

Autorovým hlavním cílem disertační práce bylo analyzovat vznik a chování materiálových trhlin vzniklých ve stěně potrubí v podmínkách koroze pod napětím (Stress Corrosion Cracking – SCC). Cíle vytyčil v pěti hlavních bodech, se zaměřením na analýzu chování SCC trhlin při kmitavých zatíženích (též s vlivem předpětí) s důrazem na experimentální výzkum. Dále se



zaměřil na zahrnutí koncentrátorů napětí (zejména vlivu svaru) na tento proces nebo posouzení statické zbytkové pevnosti po cyklické zkoušce. V neposlední řadě potom navrhl alternativní metodiku pro hodnocení bezpečnosti potrubí se SCC trhlinami.

K řešení těchto cílů zvolil autor zejména cestu experimentálního výzkumu. Práce vychází z rozsáhlé rešeršní části, popsané v kap. 2, které věnuje přes 40 stran textu. Shrnuje v ní publikované poznatky o fenoménu SCC včetně teoretického základu a publikovaných experimentálních výsledků i praktického dopadu na potrubní systémy a jejich zkoušení i inspekce. Rešeršní část je velmi dobře zpracována a vytváří ucelený vhled do šíře a složitosti dále posuzované problematiky.

Po vymezení cílů v kap. 3 (které již byly zmíněny výše) následují vlastní tvůrčí kapitoly práce kap. 4 a 5, zabývající se experimentálním výzkumem, jeho realizací a vyhodnocením, včetně fraktografických analýz. Rozsah autorem popsaných a spolurealizovaných experimentů byl nesmírně rozsáhlý – 19 potrubních těles (se stářím přes 50 let) s návaznými materiálovými a fraktografickými zkouškami a následným hodnocením cyklického růstu takřka 300 trhlín. V tomto směru je třeba ocenit, jaký objem prací autor musel vykonat, aby získal relevantní data k realizovaným analýzám. Proto bych požádal o vyjádření autora: **Byl tento výzkum součástí většího grantového/výzkumného projektu? Jaké přibližně procentuální části v tomto rozsáhlém experimentálním programu i následné analýze výsledků doktorand samostatně řešil?**

V kap.4 je vysvětlena metodika zkoušek a analýz na odebraných vzorcích ze zkoumaných trubek (např. analýza chem. složení, typy těles pro zkoušky tahem a rázem v ohybu, měření rychlosti růstu trhliny na vzorku při ohybu i tlakové zkoušky potrubních těles). Je popsána použitá aparatura a schéma komplexní potrubní cyklické zkoušky. V podkapitolách 4.1 a 4.2 autor seznamuje čtenáře se zkušebními objekty (19 trubek), se vzorky a metodikou zkoušek a analýz. Čtenář se však obtížně orientuje v popisu. Např. by bylo vhodné v kap. 4.1 uvést souhrnnou tabulku označení trubek, jejich základní parametry (průměr, tl. stěny, materiál, stáří a kde provozováno). Později se totiž v textu vyskytují označení trubek A, B, C aj, která však již nemají uvedenu žádnou bližší specifikaci. Kap. 4.2 také v tomto smyslu není vhodně strukturována. Zde by se hodil přehledný diagram/tabulka, jaké typy zkoušek doktorand realizoval a dle jaké metodiky. I když se později v kap. 5 autor vrací k výsledkům a detailům těchto zkoušek, bylo by přehlednější i zde jednoznačně kategorizovat podkapitoly: Analýza chem, složení, Zkoušky tahem, Zkoušky rázem v ohybu atp., aby je čtenář nemusel „lovit“ v souvislém textu. Chápu však autorovu snahu o zestručnění popisných částí na úkor vlastních analýz výsledků. Na druhou stranu se experimentátoři (i oponenti) zajímají o detaily přípravy a realizace měření, což jistě autor pochopí a bude tolerovat doplňující otázky.

Kap. 5 následně uvádí vlastní autorovy výsledky zkoušek a analýz. Oceňuji, že výsledky jsou získány na dostatečném počtu vzorků a jsou statisticky zhodnoceny a podrobně komentovány. Logicky největší pozornost v této části je věnována analýzám SCC trhlín. Doktorand analyzoval 298 trhlín, které zkoumal z různých hledisek a kategorií: podle jejich hloubky (tři kategorie), aplikovaného cyklického tlaku a jejich původu - v základním materiálu (ZM), ve svarovém kovu (SK) či v tepelně ovlivněné zóně (TOZ). Z měřených tenzometrických deformací na trhlinách i z fraktografické analýzy lomových ploch trhlín potom hodnotil tlakově-deformační chování (otevření/uzavření) trhlín v každé typické skupině hloubek trhlín, případně jejich cyklické šíření/nešíření na základě hodnocení hysterezního chování tenzometru na trhlině a fraktografické analýzy. **V tomto kontextu, se domnívám, je nedostatečně popsána a dokumentována strategie volby typu tenzometru a jeho umístění na trhlině, případně interakce s jinými trhlinami v blízkém okolí. Může autor informace při**



**obhajobě doplnit?** Velmi oceňuji, jak tyto analýzy autor komentuje a názorně ukazuje na odlišném chování několika konkrétních typických trhlin v dané hloubkové kategorii (šířící se a nešířící se). Komentované deformační záznamy a fotografie trhlin po rozlomení i další uváděné výsledky svědčí o pečlivém vyhodnocování i zpracování. Doktorand vybral typické chování trhlin v různých konfiguracích, aby ukázal a komentoval rozdíly v jejich deformačním chování při statickém zatěžování i při cyklování. V závěru kap. 5.2. mi ale chyběl zobecňující komentář nebo dílčí závěry. Našel jsem je však poté v kap. 6, která diskutuje výsledky všech analýz ve vzájemném kontextu, a proto tato výtka je bezpředmětná.

Kap. 5.3. popisuje zkoušku statické pevnosti potrubí po cyklickém tlakovém zatěžování. Autor nejprve uvádí, že nedílnou součástí takové zkoušky je využití dříve naměřených lomově mechanických parametrů a sestavení diagramu posouzení lomu (FAD). Autor odkazuje na výsledky výpočtů realizovaných ve SVÚM (programem Alias Hida v rámci projektu EU) a uvádí FAD diagram s výsledky simulací sedmi potrubních těles a predikované finální rozměry trhlin při porušení. Bohužel k problematice dvouparametrické lomové mechaniky a k teorii chování potrubního tělesa s trhlinou při křehko-lomové poruše nebo při poruše plastickým kolapsem neexistuje podkapitola v rešeršní části práce (v kap. 2). Vhodně by uvedla čtenáře do problematiky. Takto jsou bez návaznosti a bez bližšího vysvětlení v kap. 5.3 uvedeny pouze rovnice (4-1) až (4-3) a vypočtený FAD diagram. I když výsledky sedmi simulací, zakreslených do FAD diagramu jsou v textu podrobně komentovány, vyvstává mi řada dalších otázek, např.:

- **Jaký podíl měl autor na prezentovaných výsledcích numerických simulací a jaký byl hlavní záměr jejich publikování v kontextu tématu disertační práce?**
- **Ke konkrétnímu určení mezních křivek FAD diagramu je zapotřebí řada materiálových hodnot i teoretických vztahů. Protože v práci nejsou uvedeny, může se k problematice (např. určení oblasti kritické plastické zóny na vrubu/trhlině aj) autor vyjádřit?**
- **V rámci numerických simulací bylo určováno též HMH napětí při porušení a tedy musel být i znám predikovaný destrukční (mezní) tlak. Protože byly realizovány kromě simulací i fyzické destrukční zkoušky, lze porovnat predikované a skutečné destrukční tlaky sedmi zkoušených těles. Byla-li taková analýza provedena, proč ji autor neuvedl, případně lze výsledky v diskusi doplnit?**

V kap. 5.4 autor zhodnotil statistické rozdělení hloubek a délek SCC trhlin i jejich poměr. Následná kap. 5.5 poté uvádí experimentální hodnocení růstu SCC trhlin při únavovém zatěžování a to pro různé podmínky zatěžování – bez tlakového přetížení i s přetížením na dvě různé úrovně tlaku (89% a 110% SMYS). Výsledky jsou porovnání s referenční křivkou šíření trhliny na 3BP tělesech. Pokládám toto porovnání za jeden z hlavních výsledků práce a očekával bych jeho čitelnější zobrazení (např. větší formát obrázku pro lepší rozlišení experimentálních bodů). Navržené aproximace mohou sice být, vzhledem k velkým rozptylům dat, mírně diskutabilní, ale kupodivu jejich vzájemná porovnání odpovídají očekáváním. Vyhnul bych se však extrapolování křivek k nízkým i vysokým rychlostem šíření, mimo oblast získaných experimentálních dat.

Pomocí navržených aproximačních vztahů za použití MonteCarlo (MC) simulace autor predikoval pravděpodobnost porušení trhlin různé délky po určitém počtu zatěžovacích cyklů. Výsledky simulací považuji za velmi důležité a přínosné. Musím však poznamenat, že by si tato problematika zaslouhla rozsáhlejší a samostatnou podkapitolu. Simulační metoda MC je zde totiž podle mého názoru nedostatečně popsána, neboť její výstupy budou závislé na zadávaných datech (na předpokládaném statistickém rozdělení a volbě jeho konkrétních



parametrů). Autor sice popisuje případ simulace náhodnou volbou parametrů předpokládaného Weibulova rozdělení Parisovy konstanty za předpokladu konstantnosti jeho exponentu. Podrobnosti (tj. hodnoty parametrů rozdělení) a zdůvodnění této konkrétní volby však neuvedl ani v příloze práce. Navíc existují jistě i další možné varianty MC výpočtů. Nicméně disertant v této konkrétní simulaci ukázal, že nejčteněji zastoupené trhliny (s hl. 1 až 2 mm) neohrožují životnost produktovodu a lze je tak ponechat v provozu. Zatížení do 20 tis. provozních cyklů může být bezpečné ještě pro trhliny délek 3 mm a v případě délek 5 mm již hrozí 50% pravděpodobnost porušení do 10 tis. cyklů. Uvádí a dokumentuje, že výsledky se ještě zlepší po testu na statické přetížení potrubí (89% SMYS). Ukázal, že možné šíření trhlin ve SK či TOZ je mnohem nižší, nežli v základním materiálu. I toto považuji za významná zjištění celé experimentální a simulační práce zejména pro provozní praxi produktovodů. Následnou mikromorfologickou analýzou lomové plochy autor dokumentoval diskutované fáze únavového a závěrečného lomu. I přes zde oceněné přínosy tohoto konkrétního simulačního případu nelze ale neuvést připomínku, že MC model by mohl být i složitější (např. zahrnout variace dalších vstupních parametrů: prahové hodnoty  $K_{th}$ , Parisova exponentu  $m$  aj.) a výsledky průběhů pravděpodobnosti porušení po daném počtu provozních kmitů by tak mohly vypadat úplně jinak. Proto bych doporučil při případném zevšeobecnění brát výsledky (vycházející z této konkrétní varianty simulace) „s jistou rezervou“.

Následuje kap. 6, kde jsou podrobně diskutovány získané výsledky materiálového a metalografického hodnocení, mechanických zkoušek zkušebních vzorků i potrubních těles z předchozích kapitol 4 a 5 a to ve vzájemném kontextu. Tím lze opodstatnit účelnost této shrnující kapitoly. Autor z výsledků zjistil řadu zajímavých poznatků i námětů do diskuse nebo námětů k dalšímu výzkumu. Např. různé mechanismy difúze vodíku a nespojitost v křivce objemového podílu Vanadu (V) na maximální hloubce nalezené trhliny, střídání mechanismu růstu a latence při rozvoji SCC trhlin, nižší procentuální počet latentních trhlin vůči celkovému počtu (nežli uvádí literatura) nebo „nezávislost“ korozních důlků a SCC trhlin i náměty další. Svědčí to o rozsahu a hloubce výzkumu a jeho vyhodnocování, které doktorand provedl, i o šířce diskuse, kterou nad výsledky ve své práci vedl. Náměty a poznatky mohou být inspirací pro následovníky v této oblasti výzkumu.

V kapitole 6 dále autor hodnotí jeden z nejdůležitějších poznatků práce, a to chování trhlin při statickém a následně cyklickém zatížení. Diskutuje deformační chování trhlin a změny v otevíracím a uzavíracím tlaku na trhlíně i jejich závislost na její hloubce. Všimá si změny deformací tečením při výdrži na hladině přetížení i reziduální deformaci po odlehčení. Dále diskutuje zjištěnou cyklickou relaxaci deformace při únavovém zatížení a indukované uzavírání cyklickou plastickou deformací a rozporuje ji se zjištěnými výsledky jejich únavové odolnosti. Tyto široké diskuse opět svědčí o hloubce uvažování doktoranda nad řešeným problémem i o jeho fundovanosti v oboru.

Kapitola 6 je zakončena návrhem alternativní metodiky pro potrubní systémy s SCC trhlínami, což byl další z důležitých cílů a výstupů disertační práce. Na schématu 6-4 uvádí vývojový diagram stávající CEPA metodiky. V prvním kroku se dělí defekty do kategorií I až IV. Takové označení a charakteristiky defektů jsem ale v práci nenašel. V modifikovaném diagramu (na obr. 6-5) autor již žádné třídění SCC trhlin neprovádí. Doporučuje vyměnit úseky potrubí se závažným poškozením SCC trhlínami, získat materiálová data z těchto úseků a predikovat zbytkovou životnost na úsecích s menší závažností poškození. Domnívám se, že s poznatky v práci uvedenými, je tato predikce realizovatelná a navržené schéma tak může být vhodnou alternativou, jak úseky produktovodů s poškozením SCC hodnotit. **Otázkou ale zůstává,**



**kritérium rozhodnutí o „závažnosti“ defektu. Může se k problematice stanovení této „hranice“ uvedené v metodice autor vyjádřit?**

Kap.7 (Závěr) poté shrnuje na dvou stranách stručně a přehledně dosažené výsledky a přináší náměty pro pokračující výzkum v této oblasti.

### **Stanovisko k výsledkům disertační práce a původní přínosy disertační práce**

Disertační práce ing. Jana Kece přináší řadu původních postupů. Zejména zmíním:

U SCC trhlin se při cyklování projevuje indukované uzavírání a jejich otevírací tlak není závislý na hloubce SCC trhlin, ani na úrovni statického přetížení. SCC trhliny nevykazují žádný další mechanismus, což se projevilo nejhorší únavovou odolností. Naopak SCC trhliny, které byly zatíženy na vyšší tlak (tlak 9,55 MPa) vykazují mírné tečení spojené s tvorbou plastické zóny na čele trhlin. Rovněž dochází k poškození korozních produktů a k uplatnění uzavírání trhlin od nerovností povrchu. Tyto dva faktory vedou k retardaci růstu SCC trhlin. Statické přetížení přes SMYS, však již způsobuje, že dojde k deformačnímu zpevnění v okolí SCC trhlin a k urychlení růstu únavovým mechanismem.

Přírůstky SCC trhlin byly po cyklické tlakové zkoušce fraktograficky analyzovány a z dat byla stanovena a aproximována experimentální křivka rychlosti šíření. Byly zjištěny odolnosti SCC trhlin pro iniciaci a růst při různých úrovních přetížení. Roztyl naměřených růstových křivek byl statisticky hodnocen a pomocí Monte Carlo simulací byly zjištěny pravděpodobnosti porušení jednotlivých skupin SCC trhlin.

Statická pevnost trubek po cyklické tlakové zkoušce byla hodnocena diagramem posouzení lomu (FAD). Bylo zjištěno, že u SCC trhlin s hloubkou do 2 mm dochází výhradně k plastickému kolapsu, u SCC trhlin do 5 mm potom ke kombinovanému lomově plastickému porušení. A u trhliny s hloubkou nad 5 mm k protržení zbytkové tloušťky stěny.

Autorem byla navržena alternativní metodika hodnocení SCC trhlin, která se opírá o interní inspekci potrubní linie a o tlakové zkoušky nejhorších úseků potrubí, které budou sloužit pro určení životnosti méně závažných přeizolovaných úseků.

Nové a původní výsledky i přínosy práce jsou tak prokazatelné. Závěrem tohoto komentáře lze konstatovat, že všechny cíle práce byly beze zbytku naplněny.

### **Formální úroveň práce a publikační činnost doktoranda**

Formální úroveň práce hodnotím jako velmi dobrou. Pisatel užívá srozumitelný technický jazyk bez významových i stylistických nepřesností. Definuje a vysvětluje všechny potřebné pojmy, veličiny a zkratky. V práci jsem sice našel několik překlepů a gramatických chyb, ale vzhledem k rozsáhlosti, nese dílo známky vysoké pečlivosti. Tabulky, grafy i obrázky (až na výše kritizovanou výjimku) jsou čitelné a vypovídající, v textu komentované. Je také třeba zmínit, že autor ve svých tvůrčích kapitolách uvádí citace svých vlastních prací a dokladuje tím, že hlavní výsledky disertační práce již byly publikovány, jak to požaduje příslušný Zákon.

### **Další dotazy a připomínky k zodpovězení při obhajobě práce**

- **Jaká byla frekvence při tlakování 4-7,35 MPa pro zkušební potrubní tělesa?** V textu jsem asi přehlédl.
- Autor uvádí, že do diagramu na obr. 5-42 zakresloval dílčí zjištěné přírůstky měřené na čelech vyhodnocovaných SCC trhlin. V práci jsem nenašel pojednání (např. v rešeršní části),

**jak je určován FIN na čele trhliny s různým poměrem  $a/2c$ . Jaké korekční funkce pro FIN autor v realitě používal?**

- Na str. 101 (1 odst.) autor uvádí: „Bylo zjištěno, pomocí tenzometrických měření SCC trhlín v okolí SK, že v samotném provozu je tato oblast téměř nezatížena, proto pro propagaci NNpHSCC trhlín chybí potřebná prahová složka napětí. Při porovnání rychlosti růstu SCC trhlín únavovým mechanismem jsou vidět nižší rychlosti růstu ve srovnání s SCC trhlinami se stejným rozkmitem FIN.“ **Může autor blíže vysvětlit „absenci zatížení v okolí SK a ukázat porovnání rychlostí růstu v zamýšleném srovnání?**

**Závěrečné hodnocení**

V disertační práci doktorand Ing. Jan Kec prokázal velmi dobrou orientaci v problematice lomové mechaniky, materiálového a fraktografického výzkumu a experimentálních zkoušek. Ukázal schopnost analýzy a syntézy získaných experimentálních dat a numerických simulací a schopnost navrhnout a realizovat nová řešení a formulovat z nich užitečné závěry. Disertant publikoval řadu původních poznatků s konkrétním praktickým dopadem pro zvýšení spolehlivosti a bezpečné životnosti produktovodů. Autor v práci prokázal schopnosti samostatné vědecké práce a systematického výzkumu i kritického hodnocení získaných výsledků.

Domnívám se, že cíle práce byly v plné míře naplněny. Konstatuji, že předložená disertační práce splňuje kritéria, jak je vymezuje Zákon č. 111/1998 Sb. paragraf 47 odst. 4, tj. že obsahuje původní výsledky, které byly uveřejněné nebo jsou přijaté k uveřejnění.

Doporučuji práci k obhajobě.

Milan Růžička