

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav materiálového inženýrství

**Experimentální studium zbytkové životnosti
vysokotlakých plynovodních potrubí**

Bc. Jan Kec

Zadaní diplomové práce

pro:	Bc. Jana Kece
program:	Strojní inženýrství
obor:	Výrobní a materiálové inženýrství
název česky:	Experimentální studium zbytkové životnosti vysokotlakých plynovodních potrubí
název anglicky:	Experimental study of residual life of high-pressure gas pipelines

Zásady pro vypracování:

Cíl:

Cílem práce je detailní zjištění rozsahu a četnosti trhlin na vnějším povrchu plynovodního potrubí DN300. Ověření základních materiálových charakteristik materiálu trubky a experimentální ověření vlivu trhlin na životnost plynovodního potrubí s vadami.

Postup:

1. Defektoskopická kontrola vnějšího povrchu trub DN 300
 2. Měření tloušťky stěny trubek
 3. Ověření základních materiálových charakteristik trubek
 4. Tlaková zkouška tělesa I – cyklické tlakování na provozním tlaku 7,35 MPa
 5. Tlaková zkouška tělesa II – tlakování do destrukce
 6. Experimentální hodnocení deformačních účinků tlakování a ověření vlivu vad na životnost potrubí
 7. Závěr a hodnocení výsledků
-

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 60 stran

Rozsah grafických prací: dle potřeby

SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY:

- [1] Lubomír Gajdoš. *Bezpečnost a integrita vysokotlakých plynovodů*. Praha: Český plynárenský svaz, 2011. ISBN 978-80-904619-2-5.
- [2] Lubomír Gajdoš. *SPOLEHLIVOST PLYNOVODNÍCH POTRUBÍ*. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02143-2.
- [3] ČERNÝ, I. a J. SÍS. *Tlaková zkouška trubky DN300 s analýzami defektů, deformací, materiálu a destrukčních mechanismů: Technická zpráva SVÚM a.s. č.: 1530 100 - 3*. Čelákovice, 2015.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Elena ČIŽMÁROVÁ, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Ivo Černý, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 25. dubna 2016

Datum odevzdání diplomové práce: 29. června 2016

Neodevzdá-li student diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat diplomovou práci podruhé.

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Zadání diplomové práce převzal 18. dubna 2016:

.....
student

.....
Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
vedoucí ústavu

.....
Prof. Ing. Michael VALÁŠEK, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 18. dubna 2016

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a na základě literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze dne 29. 7. 2016

.....

Bc. Jan Kec

Poděkování

Rád bych poděkoval celému kolektivu SVÚM a.s. za cenné rady poskytnuté při tvorbě diplomové práce a za možnost spolupráce na experimentální části. Dále bych rád poděkoval Ing. Eleně Čižmarové, Ph.D. za vedení diplomové práce a za věcné připomínky při její tvorbě. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat celé mojí rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá experimentálním studiem zbytkové životnosti plynovodního potrubí DN 300, u něhož byl detekován výskyt defektů typu trhlin, přičemž podle předběžných nedestruktivních zkoušek se jednalo o defekty značné hloubky, povrchové délky a relativně vysoké četnosti. Pokud by se potvrdilo, že defekty jsou skutečně takového rozsahu, jednalo by se o velmi nebezpečnou situaci, která by vyžadovala rychlý provozní zásah. Z těchto důvodů byly součástí experimentálních prací materiálové analýzy mechanických vlastností, metalografický rozbor typických defektů a dále tlakové zkoušky do destrukce s měřením deformací na vybraných místech trubky s hodnocením vlivu trhlin na mezní stavy. Součástí práce je rozbor destrukčních mechanismů potrubí.

Klíčová slova

Potrubí, plynovod, tlaková zkouška, metalografie, únava, fraktografie

Annotation

The aim of this work is an experimental study of residual life of gas pipelines DN 300 where cracks were detected. According to preliminary non-destructive testing the defects reached up to considerable depth and surface length and with higher quantity. It would be a very dangerous situation that would require a rapid intervention if preliminary results about defects would be confirmed. Material analyses including mechanical properties testing, selected defects analyses, pressure testing up to destruction with strain gage measurements at selected locations were part of experimental program for these reasons. The evaluation of cracks presence on limit states and damage mechanisms was performed as well.

Key words

Pipeline, Gas pipeline, Stress test, Metallography, Fatigue, Fractography

Seznam symbolů

C_e	je uhlíkový ekvivalent	[hm. %]
U	je ovalita trubky	[%]
D_0^\uparrow	je maximální průměr trubky	[mm]
D_0^\downarrow	je minimální průměr trubky	[mm]
σ_o	je obvodové napětí ve stěně podtrubí	[MPa]
σ_p	je podélné napětí ve stěně podtrubí	[MPa]
p	je vnitřní přetlak	[MPa]
D	je průměr potrubí	[mm]
t	je tloušťka stěny	[mm]
R	je poloměr zakřivení trubky	[mm]
	je střední poloměr trubky	[mm]
ε	je úhel pootočení od svislé osy průřezu potrubí	[°]
ΔK	je rozkmit faktoru intenzity	[MPa.m ^{0,5}]
ΔK_p	je prahová hodnota faktoru intenzity	[MPa.m ^{0,5}]
ΔF	je rozkmit síly	[N]
a_0	je počáteční tloušťka ploché zkušební tyče pro zkoušku tahem	[mm]
b_0	je počáteční šířka ploché zkušební tyče pro zkoušku tahem	[mm]
S_0	je počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče pro zkoušku tahem	[mm ²]
	je počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče pro zkoušku rázem v ohybu	[mm ²]
L_0	je počáteční měrná délka zkušební tyče pro zkoušku tahem	[mm]
a_U	je konečná minimální tloušťka po lomu ploché zkušební tyče pro zkoušku tahem	[mm]
b_U	je konečná minimální šířka po lomu ploché zkušební tyče pro zkoušku tahem	[mm]
S_U	je minimální průřezová plocha po lomu ploché zkušební tyče pro zkoušku tahem	[mm ²]
L_U	je konečná měrná délka po lomu zkušební tyče pro zkoušku tahem	[mm]
$F_{p0,2}$	je síla při dosažení 0,2 % plastické deformace	[kN]
$F_{t0,5}$	je síla při dosažení 0,5 % celkové deformace	[kN]

F_{eH}	je síla na horní mezi kluzu	[kN]
F_{eL}	je síla na dolní mezi kluzu	[kN]
F_m	je síla na mezi pevnosti	[kN]
R_e	je výrazná mez kluzu	[MPa]
$R_{p0,2}$	je smluvní mez kluzu při 0,2 % plastické deformace	[MPa]
R_{fs}	je mez flow stress	[MPa]
$R_{t0,5}$	je mez kluzu při 0,5 % celkové deformace	[MPa]
R_{eH}	je horní mez kluzu	[MPa]
R_{eL}	je dolní mez kluzu	[MPa]
R_m	je mez pevnosti v tahu	[MPa]
A	je tažnost	[%]
Z	je kontrakce	[%]
w	je šířka zkušebního tělíska pro zkoušku rázem v ohybu	[mm]
	je šířka zkušebního tělíska (CT) pro zkoušku lomové houževnatosti	[mm]
W	je šířka zkušebního tělíska (3PB) pro zkoušku lomové houževnatosti	[mm]
h	je výška zkušebního tělíska pro zkoušku rázem v ohybu	[mm]
KV_2	je absorbovaná energie v případě zkušebního tělesa s V-vrubem při použití břitu o poloměru 2 mm	[J]
F_Q	je specifická síla odečtená ze záznamu	[N]
F_c	je specifická síla odečtená ze záznamu	[N]
L	je rozteč podpor	[mm]
Y	je tvarový součinitel	[-]
B	je tloušťka zkušebního tělíska	[mm]
a	je celková délka trhliny	[mm]
S_n	je jmenovité napětí	[MPa]
r_p	je rotační součinitel v plastické oblasti	[-]
α	je součinitel mezi tahovou a ohybovou složkou namáhání	[-]
μ	je Poissonova konstanta	[-]
K_{Ic}	je kritická lomová houževnatost při rovinné deformaci	[MPa.m ^{0,5}]
E	je modul pružnosti v tahu pro ocele je	[MPa]
z	je vzdálenost místa měření rozevření vrubu od povrchu	[mm]
V_{cp}	je plastická část rozevření trhliny	[mm]
X_i	je součinitel pro zatížení zkušebního tělesa tříbodovým ohybem	[-]

A_{CP}	je plocha plastické části v diagramu $F-f$	[MPa.m]
J_{Ic}	je kritická hodnota lomové houževnatosti stanovená pomocí J -integrálu	[MPa.m ^{0,5}]
M_F	je funkce závislá na geometrii trhliny	[-]
E_K	je eliptický integrál druhého druhu	[-]
p	je funkce závislá na geometrii trhliny	[-]
M_{TM}	je korelační faktor pro válcové skořepiny	[-]
M_T	je Foliasův korelační faktor	[-]
c	je polodélka trhliny	[mm]
t	je tloušťka stěny trubky	[mm]

Obsah

1	Úvod a stručná historie plynárenství.....	12
2	Materiálové vlastnosti.....	15
2.1	Chemické složení.....	15
2.2	Struktura ocele a její metalografická čistota.....	16
2.3	Mechanické vlastnosti.....	16
3	Technologické vlastnosti.....	20
3.1	Technologie výroby trubek.....	20
3.2	Technologie spojování trubek.....	22
3.3	Technologie ohýbání trubek.....	24
4	Provozní podmínky.....	27
4.1	Namáhání od vnitřního přetlaku.....	27
4.2	Korozní defekty.....	29
4.3	Únavové porušení.....	33
5	Tlaková rehabilitace plynovodu.....	36
5.1	Tlaková zkouška.....	39
6	Praktická část.....	41
6.1	Úvod.....	41
6.2	Defektoskopická analýza.....	42
6.3	Proměření geometrie tělesa.....	44
6.4	Měření tloušťky stěny.....	44
6.5	Chemický rozbor.....	47
6.6	Metalografický rozbor základního materiálu.....	47
6.7	Metalografický rozbor trhlin na trubce č. 2.....	48
6.8	Zkoušky tahem.....	53
6.9	Zkoušky rázem v ohybu.....	54

6.10	Zkoušky lomové houževnatosti	54
7	Tlaková zkouška.....	62
7.1	Rozmístění tenzometrů	62
7.2	Měření deformací při náběhu tlaku na 7,35 MPa	63
7.3	Měření deformací po cyklickém tlakování	68
7.4	Tlakování do destrukce.....	69
8	Fraktografický rozbor oblasti lomu	73
9	Metalografický rozbor trhlin na trubce po destrukci	77
10	Závěr a hodnocení výsledků	80
11	Seznam použité literatury	83
12	Seznam obrázků	89
13	Seznam tabulek	92

1 Úvod a stručná historie plynárenství

Na celém světě hraje plyn v energetickém průmyslu velmi důležitou roli. Jedná se o jeden z nejspolehlivějších, nejlevnějších, nejefektivnějších a hlavně nejbezpečnějších zdrojů energie. Svoji bezpečností značně převyšuje všechny druhy doprav, a to i dopravu leteckou, která je považována za nejbezpečnější z hlediska dopravních nehod [1].

První zmínky o používání zemního plynu sahají do první poloviny 9. století, kdy ho Číňané používali k rozsvícení a k vytápění svých příbytků, a také pomocí něj vyráběli sůl odpařováním mořské vody. Jejich vrty byly hluboké až 200 metrů pod zemský povrch a k rozvodu zemského plynu používali bambusové potrubí [3].

První vystavěný plynovod na našem území se objevil v září roku 1847 a byl z karbonizační plynárny v Karlíně. Přibližně půl roku na to byla uvedena do provozu první síť plynovodů z Brněnské plynárny. Ani další města nezahálela a o pár desítek let později byla naše zem protkána sítí plynovodů. Jednalo se o plynovodní potrubí přepravující svítiplyn s přetlakem pouze 1 kPa, ve výjimečných případech 8 kPa. V období první světové války došlo k prudkému rozvoji ocelářského průmyslu, a tím vzrostla produkce koksárenského plynu, který má shodné spalovací vlastnosti jako svítiplyn. Vzhledem k nadměrným kvantum koksárenského plynu, který nenašel uplatnění v bezprostředním okolí koksáren, došlo k rozvádění plynu i do vzdálenějších míst, a tím vznikali regionální plynovody. Doprava na delší vzdálenosti sebou nesla výrazné zvýšení přetlaku na 1 MPa.

Dalším impulsem pro zvýšení přetlaku bylo zavedení technologie zplyňování hnědého uhlí páro-kyslíkovou směsí v třicátých letech dvacátého století. Dosahovaný přetlak 2 až 2,3 MPa (PN 25) byl zvolen normalizovanou tlakovou řadou a byl desítky let využíván. S rozšiřováním zmíněné technologie došlo k výstavbě prvního vysokotlakého plynovodu propojující sever České republiky. Zároveň probíhala další výstavba vysokotlakého plynovodu zásobující střední Čechy.

Roku 1947 bylo rozhodnuto, že dojde k plošnému propojení celé republiky a vybudování několika velkých plynáren.

Postupem let došlo k zhuštění sítě vysokotlakých plynovodů, až bylo přepravované množství plynu okolo 2 mil. m³, a to ze čtyř velkých zdrojů: Praha, Úžín, Vřesová, Zaluží. V šedesátých letech došlo k výstavbě dvou



Obr. 1.1 Ilustrativní foto nejmodernějšího plynovodu v ČR – Gazela s DN 1400 a PN84 [2]

magistrálních plynovodů DN 500 a s propojením s dalšími plynovody došlo k vytvoření smyčky, která zvyšovala spolehlivost zásobování plynem. Ani porucha neznamenal odstavku zásobovaných měst. Postupně došlo k vytvoření desítek až stovek odboček pro zásobování měst a obcí.

Vedle této soustavy plynovodů pro přepravu svítiplynu se rozvíjela i síť pro přepravu zemního plynu, který má v našich podmínkách velmi omezené zdroje. První vysokotlaký plynovod pro přepravu zemního plynu na našem území byl uveden do provozu už v roce 1931, ale růst této sítě byl velmi pomalý. Produkce svítiplynu má své limity a bylo zřejmé, že brzy nebude dostačující, a proto došlo k upuštění od výstavby tratí pro svítiplyn. Situace vyústila v hledání zahraničního zdroje zemního plynu a byla vyřešena napojením se na plynovodní soustavu SSSR. V důsledku toho byl uveden do provozu první mezistátní plynovod DN 700 PN 55, jenž přinesl další posun v tlakové hladině a k dosáhnutí kapacity 4 mld. m³ ročně. Tato tlaková hladina a kapacita přinesla komplikovanější pohled na projektování. Bylo nutné zvládnout širší spektrum vědeckých oborů, jakými jsou termodynamika, nauka o materiálu, pružnost a pevnost, technologie svařování, defektoskopie svarů, dále také problematika korozní ochrany.

Počátkem sedmdesátých let došlo k uzavření smlouvy mezi ČSSR a SSSR, a to odstartovalo dvě desítky trvajících období postupné výstavby transitzní soustavy, která by byla schopná přenášet 28 mld. m³ ročně s přetlakem 7,6 MPa a s průměry trubek DN 1200 a DN 800. Tato transitzní soustava měla být opatřena také čtyřmi kompresorovými stanicemi (Velké Kapušany, Jabloňov nad Turňou, Velké Zlievce a Ivanka pri Nitre) s jednotkovým výkonem 6 MW [4].



Obr. 1.2 Mapa transitzního a vnitrostátního plynovodu [5]

Výstavba byla zahájena roku 1970 a v tehdejší době neměla nikde na světě obdoby a i dnes patří mezi největší přepravní systémy světa. V té době bylo nutné prohloubit všechny znalosti týkající se této problematiky, jelikož tento plynovod protínal značnou část osídlených oblastí a případná havárie by mohla mít zdrcující účinky. Muselo se pečlivě dbát na výběr materiálu, technologii výroby, svařování, pokládku a kontrolu potrubí.

Další rozvoj soustavy vedl k připojení jižní větve o stejné tlakové úrovni a zvýšení na DN 1400 (ilustrativně zobrazeno na obr. 1.1). S tím přišla nutnost připojení dalších kompresorových stanic. Koncem osmdesátých let dosahoval výkon téměř 1000 MW. Soustava, vybudovaná původně pro přepravu svítiplynu, byla postupně napojována na vnitrostátní plynovod, který je větví právě zmiňovaného transitního plynovodu (Obr. 1.2). Tuto velice rozsáhlou síť plynovodů je nutné udržovat v nejvyšší možné bezpečnosti, a je proto nutné velmi pečlivě kontrolovat a zaznamenávat vliv všech faktorů snižující životnost potrubí [4].

Bezpečnost vysokotlakých potrubí je dána celým souborem faktorů, které se různou vahou podílejí na zbytkové životnosti potrubí. Tyto faktory se dají přehledně dělit následujícím způsobem:

- a) materiálové vlastnosti: druh použité oceli, chemické složení oceli, metalografická čistota, pevnostní vlastnosti, vrubová a lomová houževnatost
- b) technologické vlastnosti: technologie výroby trubek, technologie ohýbání trubek, technologie spojování trubek
- c) provozní podmínky: namáhání od vnitřního přetlaku, korozní defekty, nízkocyklová únava (způsobená odstávkami a kolísáním tlaku plynu v závislosti na odběru), vysokocyklová únava (v okolí kompresorových stanic) [6].

Teoretická část této práce podrobně rozebírá vliv tohoto souboru faktorů na životnost potrubí s návrhem odstranění nebo úplného potlačení jejich účinku.

Praktická část této práce ověřuje integritu segmentů trubek DN 300, u nichž byl v provozu detekován výskyt defektů typu trhlin. Defekty byly detekovány provozovatelem s informací, že jde o defekty značné hloubky, povrchové délky a četnosti. Takováto situace by vyžadovala rychlý provozní zásah, jelikož by mohlo dojít k destrukci potrubí. Takto nebezpečné defekty jsou v práci vyloučeny s konstatováním, že nehrozí bezprostřední havárie potrubí. Práce také rozšiřuje soubor informací o tomto potrubí po určité době provozu materiálovými analýzami a objasňuje destrukční mechanismy plynovodu.

2 Materiálové vlastnosti

Jak již bylo zmíněno v úvodu, se zvyšováním provozních tlaků a průměrů, bylo nutné zavést přísnější parametry chemického složení ocelí pro plynovody a mít stále přesnější hodnoty mechanických vlastností použitých ocelí pro plynovody. Mezi nejzákladnější mechanické vlastnosti patří hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ ($R_{t0,5}$) a meze pevnosti získané z chování tyče zatížené tahem. Jde o standardní zkoušku určující deformační charakteristiku v závislosti na zatěžující síle. Pro popis odolnosti proti křehkému porušení je využívána zkouška rázem v ohybu za snížených teplot. Lomové mechanické vlastnosti materiálu charakterizují jeho odpor vůči lomu popř. nárůstu trhliny, tento odpor je vyjádřen kritickými hodnotami faktoru intenzity.

2.1 Chemické složení

Doložením chemického složení při dodávce trubek je běžnou součástí, kterou výrobce zaručuje budoucí technologické zpracování (svařování), strukturální čistotu a mechanické vlastnosti. Dle příslušné normy [7] jsou přesně stanovené předpisy pro maximální hodnotu obsahu uhlíku, která je dána druhem oceli od 0,21 % (L175 nebo A25) do 0,28 % (L485 nebo X70), a také technologií výroby trubky. Pro všechny typy ocelí je stanoven limit obsahu síry na hodnotě 0,020 hm. % a limit obsahu fosforu na hodnotě 0,025 hm. %. Uhlíkový ekvivalent (dán vztahem 2.1) může dosahovat maximálně do 0,45 hm. % a je vyžadováno použití oceli uklidněné.

V českých normách nebyly dříve přesně stanovené oceli pro plynovody a při použití ocele např. třídy 11 stačilo doplnění atestu o prvky, které ovlivňují uhlíkový ekvivalent [1].

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (2.1)$$

kde písmeny značíme chemický prvek a jeho obsah v hmotnostních %

2.2 Struktura ocele a její metalografická čistota

Struktura materiálu trubky se vyhodnocuje pomocí optických světelných mikroskopů v podélném i obvodovém směru. Hodnotí se typ struktury, velikost zrna, řádkovitost, hloubka oduhličení povrchu, mikročistota struktury tzn. výskyt oxidických nebo sulfidických vměstků.

Nejčastěji se jedná o strukturu feriticko - perlitickou, ale u dálkových a magistrálních větví se můžeme setkat i s termomechanickým zpracováním (TM) ocelových pásů, a tudíž s dvoufázovou strukturou austeniticko - feritickou, bainiticko - feritickou nebo martenziticko - feritickou. Oceli, které jsou takto termomechanicky zpracované, samozřejmě vykazují mnohem lepší mechanické i křehkolomové vlastnosti [1]. Výhodou také je, že je snížen obsah C a oceli mají nižší uhlíkový ekvivalent a dobrou svařitelnost [4].

Na bežešvých trubkách válcovaných za tepla se někdy vyskytují přikalené plochy. V těchto plochách se velice často vyskytují trhlinky. Přikalení a následné trhlinky vznikají u výrobce při nevhodném chlazení trub na vychlazovacím loži. S dobou se však mohou ještě dále zvětšit účinky pnutí. Obvykle mají převažující podélný průběh a mohou dosahovat i podstatně větších délek (až 200 mm). Tyto trhlinky při běžném provozním tlaku vedou k výronu plynu a k nezbytným opravám. Podle šetření Linharta a spol. [8] mají charakter kalících trhlín a probíhají převážně kolmo k povrchu. V přikalených místech tvrdost často přesahuje 400 HV, při tvrdosti v nepřikalené části kolem 190 HV.

2.3 Mechanické vlastnosti

Pro pevnostní dimenzování potrubí je velmi důležité znát mechanické vlastnosti použité oceli, a to hlavně když se jedná o dimenzování potrubí magistrálních nebo vnitrostátních plynovodů. Tyto plynovody dosahují velmi vysokých přetlaků, a to až 8,5 MPa a jsou v kombinaci s velkým průřezem trubky. Mechanické vlastnosti jsou dále kombinovány s příslušným koeficientem bezpečnosti. Hodnoty koeficientu bezpečnosti leží v určitém rozpětí, které je stanoveno na základě předpisů pro místa, kterými plynovod prochází. Pro konstrukci z toho vyplývá, že při použití trubek o stejném průměru je potřeba volit různou tloušťku stěn. V těchto bezpečnostních koeficientech jsou zahrnuta určitá zjednodušení vlivu prostředí.

Mez kluzu a mez pevnosti (mez flow stress) jsou získávány tahovou zkouškou na vzorcích vyříznutých ze stěny potrubí, a to v podélném a obvodovém směru. Zkušební tyče pro tahovou zkoušku mohou mít válcový nebo plochý tvar. Ploché tyče jsou vyrobeny odfrézováním z povrchu

stěny trubky a jejich tloušťka odpovídá tloušťce stěny trubky. Mají tudíž vnitřní a vnější povrch totožný jako povrch potrubí, který je nerovnoměrný, obsahující zbytky povrchové úpravy na vnější straně a lehké zbytky koroze na vnitřní straně. Proto bylo autory prověřeno na porovnávacích tahových zkouškách, zda má povrch vliv na mechanické vlastnosti a bylo zjištěno, že nedochází k výraznějšímu rozptylu dat [9]. V případě plochých zkušebních tyčí musí po vyříznutí dojít k jejich narovnání a tím dojde k vytvoření jiných napjatostních podmínek, než za kterých je trubka namáhána vnitřním přetlakem při provozu. Rovnění se provádí na lisech a ne vždy je dosaženo přímkového tvaru v celém objemu tyče. Kontrola rovinnosti se provádí přiložením na rovnou desku. Válcové tyče nemusí být rovnány, ale osa zkušebních vzorků nesleduje zakřivený tvar stěny trubky a je posunuta do oblasti tlakového namáhání, tedy k vnitřnímu povrchu. Při výrobě dojde také k odstranění povrchových vrstev stěny trubky a obráběním ke zpevnění povrchu a i částečně k odstranění vnitřních pnutí z výroby. Nemělo by se opomenout, že i délka vzorků může ovlivnit výsledky tahové zkoušky.

Hodnoty vrubové houževnatosti jsou získávány z práce potřebné k přeražení zkušební tyče, která je vyfrézována ze stěny potrubí a nesmí být v žádném případě rovnána [10].

2.3.1 Mez kluzu

Z hlediska projektování plynovodů je mez kluzu jednou z nejdůležitějších hodnot. Rozlišujeme tři druhy meze kluzu: R_e (R_{eh}), $R_{t0,5}$, $R_{p0,2}$. U ocelí s výraznou mezí kluzu používáme označení R_e a u ocelí s nevýraznou $R_{p0,2}$, která odpovídá 0,2 % trvalé deformace. V zahraničních normách se obvykle udává hodnota $R_{t0,5}$ odpovídající 0,5 % celkové deformace na měřené délce zkušební tyče. Pro zjišťování $R_{t0,5}$ je nutné využít při tahové zkoušce extenzometru a ne pouhé snímání deformace z pohybu příčnicku. Je nutno podotknout, že u ocelí pro potrubní systémy jsou rozdíly mezi $R_{p0,2}$ a $R_{t0,5}$ minimální.

Další důležitou charakteristikou je poměr mezi $R_{t0,5}/R_m$ a tažnost oceli. U nízkouhlíkových ocelí se tento poměr pohybuje do 0,8 a u ocelí termomechanicky zpracovaných (kalených) až do 0,9.

2.3.2 Mez flow stress

Mez flow stress je další důležitou hodnotou, na kterou je nutné brát zřetel. Nejedná se jako v případě meze kluzu o hodnotu zaručenou, nýbrž výpočtovou. Používá se při elastoplastických lomových analýzách jako mezní, v některých případech nahrazuje mez kluzu. Odpovídá strukturnímu

stavu, kdy nastává oddělování matrice od křehkých inkluzí (karbidů, kysličníků, sulfidů atd.). Stanovení této meze není zatím přesně formulované, ale nejčastěji se používá tento vztah [1]:

$$R_{fs} = \frac{R_e(R_{t0,5}) + R_m}{2} \quad (2.2)$$

kde

R_{fs} je mez flow stress [MPa]

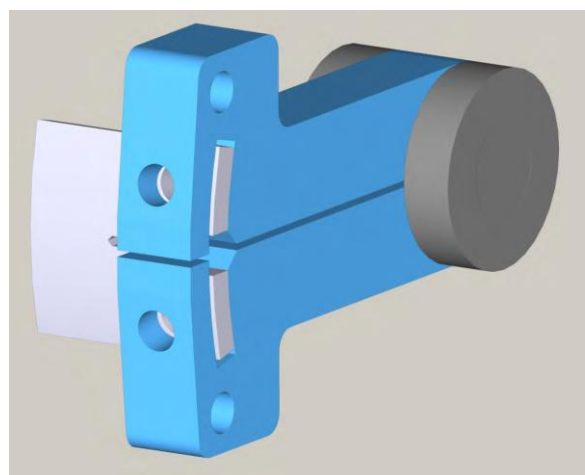
R_e je výrazná mez kluzu [MPa]

$R_{t0,5}$ je mez kluzu při 0,5 % celkové deformace [MPa]

2.3.3 Vrubová a lomová houževnatost

Z hlediska porušování má vrubová houževnatost velký vliv při posouzení zbytkové životnosti plynovodních potrubí a slouží k doplnění vlastností získaných tahovou zkouškou. Jedná se o schopnost testovaného materiálu odolávat křehkému porušení, a to je zásadní pro plynovody vedoucí např. nad vodními toky. Vzorky jsou opatřeny V-vrubem kolmo orientovaným na povrch a posléze jsou podrobeny nárazové práci při teplotě 0°C. Stanovení rázové práce se provádí minimálně na třech vzorcích odebraných z podélného i obvodového směru. V případě svařovaných trubek do šroubovice jsou vzorky odebírány i ve směru rovnoběžném na svar a z těchto hodnot stanovujeme průměrnou a minimální hodnotu. Na rozdíl od přípravy vzorků na tahovou zkoušku nesmí být vzorky pro vrubovou houževnatost rovnány [12].

Při stanovování lomové houževnatosti není normou definováno, jestli mohou být vzorky rovnány či ne, proto se tímto vlivem rozhodli zaobírat Gajdoš, Šperl a Crha v [11] a došli k zajímavým poznatkům pro praxi. Pro svůj experiment si vybrali trubní těleso DN250 (Ø 266/8) vyrobené z nízkouhlíkové oceli ČSN 41 1353, ze kterého vyrobili 16 CT-vzorků (excentrický tah) z podélného směru. První skupina osmi vzorků byla rovnána na lisu a druhou skupinu osmi vzorků ponechali s přirozenou křivostí (OCT - vzorky). První skupina byla standardně upnuta do stroje a druhá skupina



Obr. 2.1 Speciální nůžkový přípravek [11]

OCT - vzorků byla upnuta do speciálně vyrobeného přípravku (tzv. nůžkový přípravek viz obr. 2.1).

Tento nápad přebrali z práce [13]. Je nutno poznamenat, že nacyklování trhlin bylo prováděno na stejném stroji a za stejných parametrů, na rozměrově stejných vzorcích, aby nedošlo k ovlivnění experimentu. V práci bylo zjištěno, že R - křivka pro OCT vzorky leží pod R - křivkou pro rovnané CT - vzorky, a že nejvíce byla ovlivněna hodnota J_{in} o skoro 35 % nižší, $J_{0,2}$ o 3 % nižší a J_m o 1,1 % nižší u OCT - vzorků. Gajdoš, Šperl a Crha však konstatovali, že rovnání vzorků zásadně neovlivní výsledky lomové houževnatosti.

3 Technologické vlastnosti

Výše popsané materiálové vlastnosti jsou vstupním souborem dat, který vstupuje do určování zbytkové životnosti vysokotlakých plynovodních potrubí. Velkou měrou na životnosti se dále podílí technologie výroby plynovodních systémů, a to jak samotná výroba úseků trub, tak spojování těchto úseků v celky. Trubky nižších průměrů jsou vyráběny válcováním a trubky větších průměrů naproti tomu svařováním, ať už jde o svary podélné, příčné nebo šroubovicové. Obrovská délka svarů přináší spoustu defektů a to i přes to, že lidský faktor je omezen na minimum, jelikož se jedná o výrobu polo-automatizovanou nebo plně automatizovanou. Tyto defekty platí samozřejmě i pro trubky válcované, jelikož jsou následně také spojovány svařováním. Trubky válcované přinášejí svoje výrobní vady, a proto je nutné plynovody i po výstavbě nadále sledovat a posuzovat, jaký vliv mají tyto defekty na pevnost.

3.1 Technologie výroby trubek

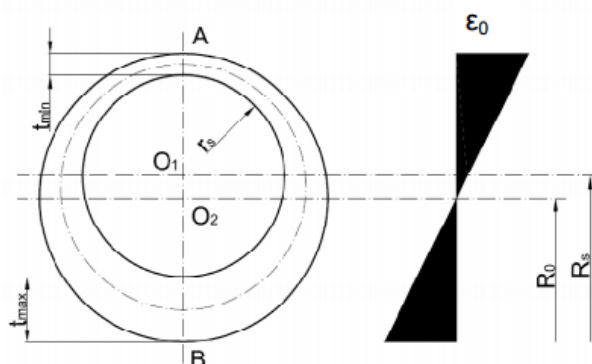
Použité trubky pro vytvoření plynovodní soustavy dělíme na dvě skupiny, trubky bezešvé a trubky svařované. Trubky bezešvé se uplatňují v plynovodních potrubích menších průměrů, a to do cca 700 mm. Pro větší průměry se používají trubky svařované.

3.1.1 Trubky bezešvé

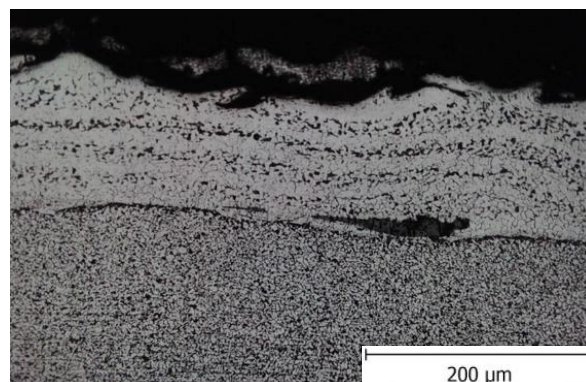
Tyto trubky se uplatňují převážně pro plynovody nemagistrálních větví, kde není zapotřebí velkých průměrů pro dodávky velkého objemu plynu. Bezešvé trubky mají skoro stopadesátiletou tradici, kdy prvními průkopníky v tomto ohledu byli bratři Mannesmanovi a podle nich se jmenuje jedna ze dvou technologií výroby bezešvých trubek. Mannesmanův způsob výroby bezešvých trubek se skládá ze dvou technologických operací: z kosého válcování tlustostěnných předvalků ve válcovací děrovací stoličce s mimoběžně uloženými válci a z postupného periodického válcování dutých předvalků na poutnické stoličce. Takto lze vyrábět polotovary o průměrech od 50 - 660 mm a tloušťky stěny od 2,5 - 50 mm [14]. Touto metodou vyráběli bezešvé trubky dodávané na výstavbu plynovodních sítí v sedmdesátých letech výrobci jako VT Chmutov, ŽDB a jiní [4].

Dopad technologie výroby bezešvých trubek na integritu

Typickou vadou vzniklou válcováním trubek je necelistvost vnitřního a vnějšího povrchu (přeložka, šupina). Jejich závažnost je dána orientací, délkou a hloubkou. Když se tyto vady stáčí rovnoběžně s povrchem, nemusejí mít žádný vliv jako tomu bylo v případě řešené trubky DN 300 (Obr. 6.7 Indikace č. 2). Při vyšším rozměru těchto vad je možné je pozorovat pouhým okem, nejčastěji jsou nalezeny při defektoskopické kontrole.



Obr. 3.1 Schéma výstřednosti trubky [15]



Obr. 3.2 Zdvojení stěny trubky DN 300 [16]

U bezešvých trubek se může vyskytnout zdvojení stěny tzv. pleny (Obr. 3.2), jejíž vznik je podmíněn nedodržením tvářecí teploty polotovarů. Tím dojde ke vzniku dvou stěn namísto jedné kompaktní stěny. Jejich nalezení lze zajistit pouze defektoskopickou kontrolou.

Další vadou vyskytující se u této technologie je výstřednost trubky (Obr. 3.1), kdy dochází k lokálnímu ztenčení stěny trubky. Ke ztenčení stěny trubky dochází řádově o jednotky procent z nominální tloušťky stěny trubky, z čehož plyne, že bez kombinace s jiným defektem výrazně neohrožuje bezpečnost plynovodu.

Poslední zmíněnou vadou je zploštění kruhového průřezu neboli ovalita (Obr. 3.7), která vzniká z výroby, anebo při ohýbání rovných úseků na části anuloidů. V prvním případě nemívá tak zásadní vliv a pohybuje se kolem 2 %, v druhém dosahuje až 4 %. Tento defekt bude podrobněji probrán v kapitole 3.3 Technologie ohýbání trubek [10].

3.1.2 Trubky svařované

Trubky bezešvé mají své rozměrové omezení, a to do průměru 720 mm. Při jejím překročení je nutné zvolit trubky svařované, které se používají již od průměru 500 mm. Svařované trubky jsou

vyráběny z ocelových sviteků nebo plechů, které mohou být normalizačně nebo termomechanicky válcovány popř. v zušlechtěném stavu. K svařovaným trubkám byla v prvopočátku nedůvěra a dávala se spíše přednost trubkám bezešvým, až do jejich rozměrové hranice. Tato nedůvěra byla oprávněná, jelikož svary obsahovaly řadu defektů typů: neprůvar v kořenové oblasti, studené spoje, převýšení svaru atd. Až s vývojem svařování a kvalitou defektoskopických kontrol se situace zlepšila a dnes se dá konstatovat, že se únosnost a bezpečnost bezešvých a svařovaných trubek srovnala.

Svařované trubky můžeme dělit podle směru svařování, a to na:

- a) trubky podélně svařované
- b) trubky se šroubovicovým svarem,

dále podle druhu svařování na:

- a) trubky svařované tlakem
- b) trubky svařované tavným svařováním.

Do první skupiny spadá vysokofrekvenční indukční svařování trubek (HFW) a do druhé svařování trubek pod tavidlem (SAW a COW).

3.2 Technologie spojování trubek

Spojování trubek se uskutečňuje ručním obloukovým svařováním obalenou elektrodou, kdy vzniká obvodový svar spojující dva segmenty v jeden. Obloukové svařování obalenou elektrodou je voleno z důvodu vysokých proudových hodnot a z toho vyplývajících menších nároků na kvalitní sesazení svarových ploch, dále také pro možnost svařovat ve všech polohách. Kvalita těchto svarů je nižší než u svarů továrních z důvodu špatných podmínek a složité dostupnosti k místu svařování. Z tohoto důvodu vzrostl počet kontrolovaných svarů z 5 % na 15 % a vývojem došlo i ke zkvalitnění defektoskopických prohlídek [4].

Při výstavbě nejnovějšího plynovodu v České republice - Gazela byl zde poprvé použit speciální robot obr. 3.3, který svařuje trubky pod tavidlem (SAW). Svařovány jím byly 18 metrů dlouhé kusy trubky k sobě a ty byly následně převezeny před výkop, kde byly svařeny obloukově obalenou elektrodou. Takže byla vytvořena soustava, v níž se střídá jedna svarová housenka vařena ručně a jedna pod tavidlem, a to je u nás zatím unikátní. Svařovací rychlost robota je při správném sesazení konců zhruba 28 mm/s na obvodovém svaru. Ve srovnání s ručním svařováním je to naprosto nesrovnatelné, jak z hlediska kvality, tak i rychlosti [17].



Obr. 3.3 Speciální svařovací robot pro tvorbu svarů pod tavidlem metodou SAW [18]

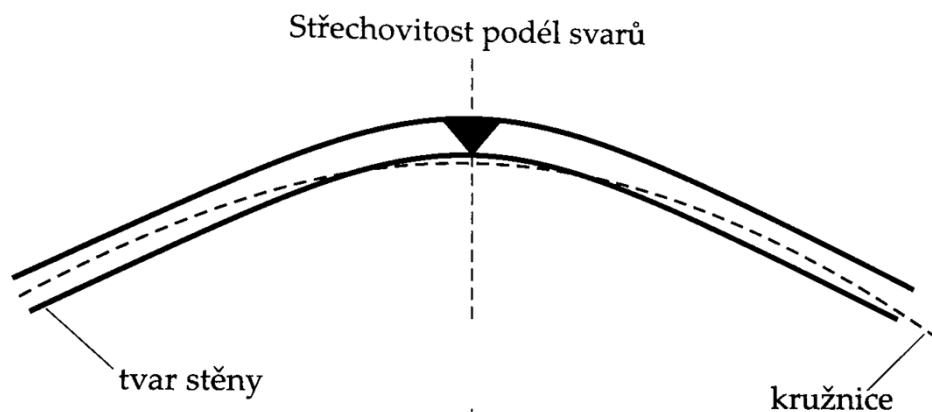
Defekty vzniklé svařováním

Tato kapitola se zabývá defekty vzniklé svařováním, a to jak pro technologii spojování trubek, tak pro technologii výroby svařovaných trubek, i přestože se jednalo o jiné svařovací metody. Výroba svařovaných trubek je poloautomatizovaná nebo plně automatizovaná a tudíž je u ní výskyt defektů mnohem méně častý, než u svarů montážních prováděných před výkopem.

U trubek svařovaných podélně i do šroubovice dochází při nedostatečném protváření konců plechů ke vzniku střečovitosti znamenající převýšení od ideálního kruhového průřezu trubky (Obr. 3.4). Střečovitost může dosahovat až poloviny tloušťky stěny trubky, způsobující až dvojnásobek základního obvodového napětí, takže je nutné počítat s překročením meze kluzu v daném místě.

U svarů plynovodních trubek dochází také k přesazení svarových ploch, z kterého také plyne zvýšení osového napětí. Tento defekt vzniká při nevhodném napasování konců trubek k sobě nebo jejich rozměrovou nedokonalostí. Vzniklé osově napětí je závislé, jak na velikosti přesazení, tak i na poloměru zaoblení krycí vrstvy housenky v daném místě.

Převážně u montážních svarů dochází k náhlému převýšení svaru nad povrch tělesa, ostrému nasazení závěrečné housenky, neprovaření kořene nebo ke vzniku pórů ve svarovém kovu. V každém případě se jedná o koncentrátoři napětí a sami o sobě nebo v kombinaci s jinou vadou mohou vést k lokálnímu zvýšení napětí ve stěně trubky, které může v nejhorším případě končit destrukcí plynovodního potrubí [4].



Obr. 3.4 Schéma střechovitosti svarů [1]

3.3 Technologie ohýbání trubek

Plynovodní systémy jsou složeny ze dvou základních tvarově odlišných částí přímých úseků a z úseků kruhově zakřivených. Ohyby je možné provádět za tepla s poloměrem ohybu $R = 5 - 10D$ a nebo za studena s poloměrem ohybu $R = 50D$, kde D je průměr potrubí a R je poloměr ohybu trubky. Různou kombinací těchto částí dochází k vytvoření tvarově složitých plynovodních systémů zajišťujících bezpečnou dopravu plynu ze vzdálených i blízkých těžebních ložisek [1]. Při ohýbání trubek za tepla se využívá indukčního ohřevu viz obr. 3.5 [19].



Obr. 3.5 Ohýbání trubek za tepla [19]

Ohyb rovných úseků na části anuloidů je uskutečňován působením ohybové síly, která vyvozuje vnější ohybový moment M_o . Ohybový moment M_o je kromě ohybové síly ovlivňován také technologií ohýbání a vlastnostmi trubky. Při ohybu dochází k vyvolání napětí, které v trubce způsobují deformace. Průběh těchto napětí v závislosti na druhu ohybu jsou zobrazeny na obr. 3.6.



Obr. 3.6 Průběh napětí při ohybu [15]

Při ohybu oblouků z plynovodních trubek dochází k zploštění kruhové průřezu. Abychom tento nežádoucí faktor eliminovali, vkládáme do nitra trubky výplň. Tyto výplně mohou být tuhé, tekuté, elastické, sypké nebo mechanické [15].

Defekty vzniklé ohýbáním trubek

Jednoznačným defektem, který byl zmíněn již v předešlé kapitole, je zploštění kruhového průřezu (ovalita), který lze při použití výplně eliminovat. Důsledkem tohoto zploštění jsou přídavné ohybové momenty k základní membránové napjatosti od vnitřního přetlaku. Ovalita trubek způsobená technologií ohýbáním se může pohybovat až do 4 % a je definovaná tímto vztahem:

$$U = 200 \frac{D_0^\uparrow - D_0^\downarrow}{D_0^\uparrow + D_0^\downarrow} \quad (3.1)$$

kde

U je ovalita trubky [%]

D_0^\uparrow je maximální průměr trubky [mm]

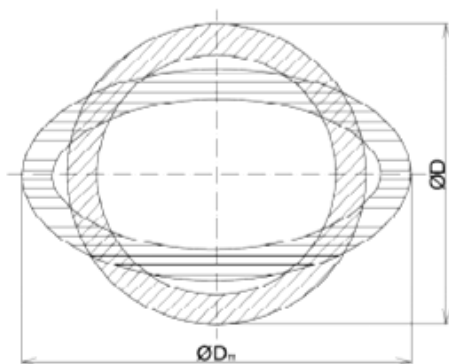
D_0^\downarrow je minimální průměr trubky [mm]

V praxi při zvyšování pracovního přetlaku nastává vyrovnávání eliptického průřezu na kruhový, a to má velký význam při kooperaci s jinou vadou, jakou je například koroze. V tomto případě může dojít až ke zvýšení poměrné deformace o 30 - 40 %, a tím k rozvoji plastických deformací. U trub s větším poměrem D/t (poměr průměru trubky/tloušťka stěny trubky) je ověřeno,

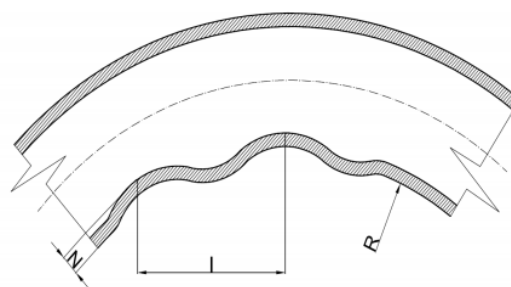
že při tlacích nižších než je provozní, dojde k vyrovnání průřezu. Ovalita výrazně ovlivňuje obvodové deformace a napětí v průřezu [20].

Dalším důsledkem technologie ohýbání je zvlnění vnitřní strany oblouku trubky (Obr. 3.8), které je způsobené tlakovým napětím v materiálu v místě ohybu. Tento jev by se mohl projevit při opakované změně tlaku v potrubí a mohla by v tomto místě vzniknout únavovou trhlinka.

Tahovým napětím na vnější straně oblouku dochází ke ztenčení stěny. Ztenčení stěny se velmi špatně potlačuje a vyskytuje se skoro ve všech případech [15].



Obr. 3.7 Schéma ovality [15]



Obr. 3.8 Schéma zvlnění [15]

4 Provozní podmínky

Vstupní parametry, ať už se jedná o materiálové vlastnosti popsané v kapitole 2 nebo defekty vzniklé jakoukoliv technologií z kapitoly 3 využitou pro tvorbu plynovodních sítí, jsou pouze vstupním souborem dat, která lze výrobně ovlivnit, ale samotný provoz má největší vliv na celkovou životnost plynovodu. Nejdůležitější určitě je, jak velký vnitřní přetlak bude dané potrubí přenášet, následně v jaké poloze vůči zemskému povrchu se bude nacházet, jakým kontinentem bude procházet a jak často bude docházet k odstávkám provozu (a na velikosti rozptylu nominálního tlaku).

4.1 Namáhání od vnitřního přetlaku

Plynovody jsou dlouhé až stovky tisíců kilometrů, procházejí různým podnebím a liší se způsobem uložení v dané krajině, a to jak nad povrchem zemským, pod povrchem zemským, tak i pod mořskou hladinou. Všechny tyto skutečnosti mohou ovlivnit životnost plynovodního potrubí, ale za nejzásadnější je považováno zatížení vnitřním přetlakem. Je-li brán v úvahu pouze vnitřní přetlak plynu, tak ve stěně potrubí vyvozuje napětí obvodové σ_o a napětí podélné σ_p , pro které platí vztahy [5]:

$$\sigma_o = \frac{p \cdot D}{2 \cdot t} \quad (4.1)$$

$$\sigma_p = \frac{p \cdot D}{4 \cdot t} \quad (4.2)$$

kde

σ_o je obvodové napětí ve stěně potrubí [MPa]

σ_p je podélné napětí ve stěně potrubí [MPa]

p je vnitřní přetlak [MPa]

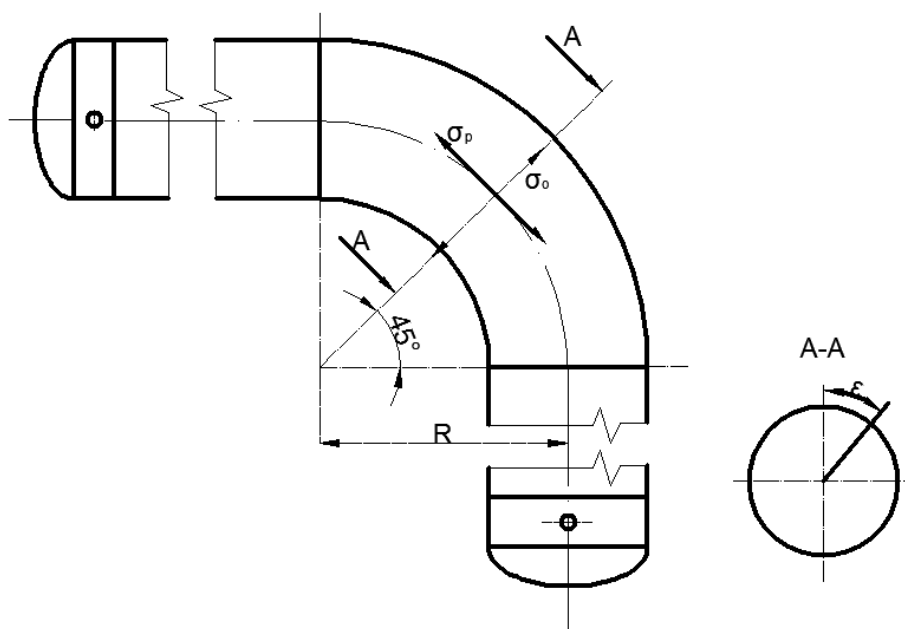
D je průměr potrubí [mm]

t je tloušťka stěny [mm]

Obě tato napětí jsou membránová. Membrána je tenkostěnný útvar, který je schopný přenášet pouze rovnoměrně rozložené tahové napětí po celém průřezu stěny. Potrubí, ale není považováno za membránu, ale za skořepinu, protože je schopné přenášet i ohybové napětí, které vzniká například uložení potrubí na volném povrchu zeminy, technologií spojování trubek, nahodilým rozložením zásypu zeminy, pohybem zeminy nebo porušením třetí stranou.

Pro kruhově zakřivené úseky platí, že se napětí obvodové liší v závislosti na úhlu pootočení od svislé osy průřezu potrubí (v obr. 4.1 značené ε), a také na poloměru zakřivení úseku R oproti základnímu membránovému vzorci 4.1. Je nutné také poznamenat, že v každém úhlu zakřivení je dokonale kruhový průřez. Názorně bude předveden výpočet obvodového napětí na části potrubí z praktické části.

Jedná se o potrubí o průměru $D_n = 300 \text{ mm}$, zatížené pracovním tlakem $p = 7,4 \text{ MPa}$, o tloušťce stěny $t = 15 \text{ mm}$ a poloměru ohybu $R = 1000 \text{ mm}$. Výpočet bude nejdříve proveden za konstantní tloušťky stěny a posléze bude přepočten na konkrétní tloušťku stěny pomocí měření tloušťky stěn ultrazvukovou metodou (6.4 Měření tloušťky stěny). Všechny hodnoty tloušťky stěny budou brány v řadě 35 a v pozicích od A – J, odpovídající přibližně úhlu 45° .



Obr. 4.1 Schéma kruhově zakřiveného úseku

Pro obvodové napětí platí vztah vázaný kromě tlaku, průřezu a tloušťky stěny, také na úhlu pootočení ε a platí pro něj vztah:

$$\sigma_o = \frac{p \cdot D}{2 \cdot t} \cdot \frac{\left(R + \frac{D}{4} \cdot \sin \varepsilon\right)}{R + \frac{D}{2} \cdot \sin \varepsilon} \quad (4.3)$$

kde

σ_o je obvodové napětí ve stěně potrubí [MPa]

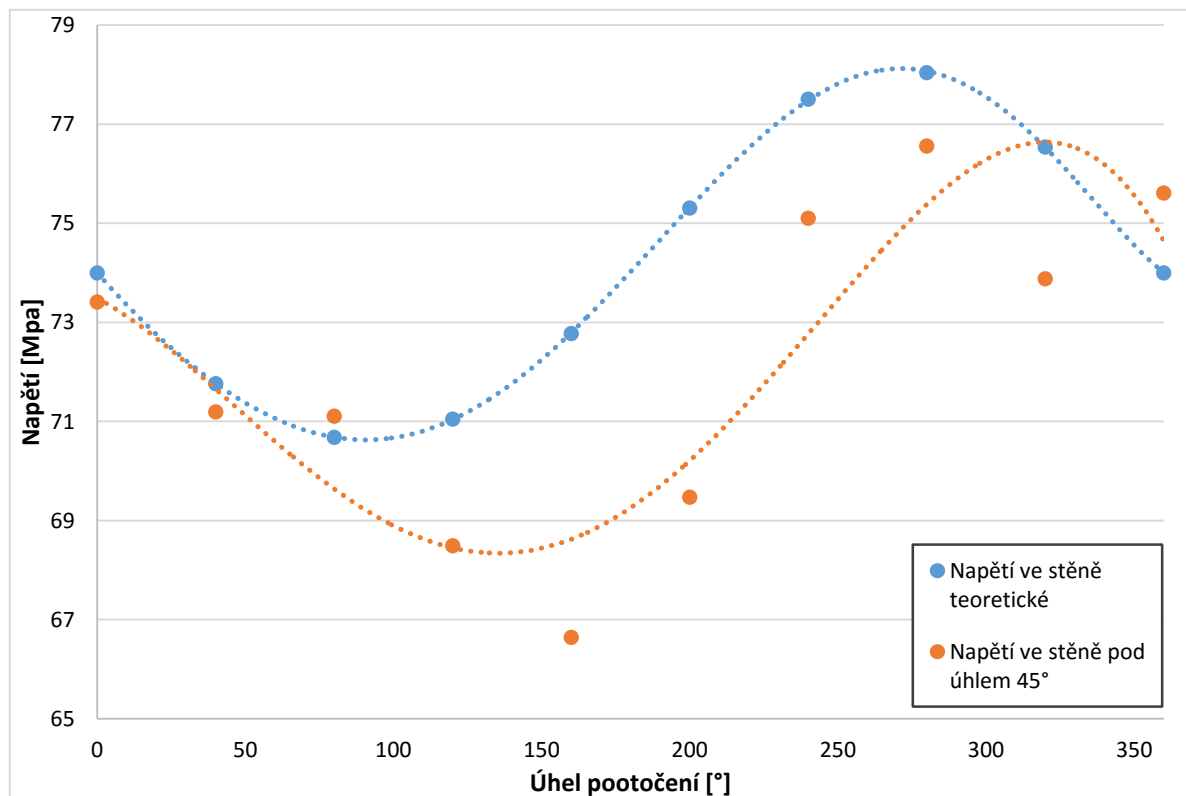
p je vnitřní přetlak [MPa]

D je průměr potrubí [mm]

t je tloušťka stěny [mm]

R je zakřivení [mm]

ε je úhel pootočení od svislé osy průřezu potrubí [°]



Obr. 4.2 Průběh obvodového napětí v oblouku

Na grafu je modrou křivkou uveden průběh obvodového napětí v závislosti na úhlu pootočení a je vidět, že nejvyšších hodnot napětí ve stěně trubky je dosaženo při úhlu 270 °, tedy na vnitřní straně oblouku. Jedná se o napětí vztažené na nominální tloušťku stěny. V praxi dochází ke zvýšení tloušťky stěny trubky na vnitřní straně a ke ztenčení tloušťky stěny na vnější straně oblouku, tím se částečně zvýšené napětí na vnitřní straně eliminuje a průběh napětí je naznačen oranžovou křivkou na obr. 4.2.

4.2 Korozní defekty

Potrubí je z výroby z vnější strany chráněno proti korozi různými povrchovými úpravami, ale ani ty nedokážou vždy zajistit kompletní izolaci, jelikož může dojít k jejich narušení a přístupu

prostředí k povrchu trubky. Z vnitřní strany může dojít ke korozi při neúplném vysušení a vyčištění potrubí nebo nekvalitním zemním plynem, který může obsahovat korozní startéry. Koroze v průměru činí cca 17 % z celkového počtu poruch [1] a dělí se do skupin podle objemového rozsahu:

- a) plošnou korozi
- b) důlkovou korozi
- c) korozi pod napětím.

4.2.1 Plošná koroze

Plošná koroze je kruhový nebo eliptický útvar dosahující až desítky centimetrů po obvodu, který není kvalifikován jako velmi nebezpečný defekt a s velmi vysokou bezpečností lze připustit u trubek od 150 do 600 mm i hloubku do 1/3 tloušťky stěny [1]. U tohoto typu koroze dochází k postupné ztrátě plastické stability v rozsáhlých oblastech stěny trubky. Vyskytuje se hlavně na vnější straně potrubí a její rychlost je ve velmi agresivních prostředích (přímořské oblasti) okolo 0,5 mm za rok [21]. V střední korozní agresivitě, v jaké se nachází ČR, je rychlost koroze pouze 0,03 mm za rok [21], takže aby došlo k dosažení hloubky korozního důlku do 1/3 hloubky stěny trvalo by to více než 100 let. To zatím převyšuje životnost většiny plynovodních systémů u nás.

S korozi se může pojít i zhoršení mechanických vlastností v průběhu provozu, jelikož atmosféra a půda, v níž je plynovod provozován, může obsahovat bakterie, soli, CO₂, vodík a jiné a tím snižovat mez kluzu, mez pevnosti a houževnatost.

Při numerických výpočtech lomového obvodového napětí je profil defektu nahrazován obalovou křivkou reliéfu dna. Podle metody výpočtu se odlišně stanovuje mez flow stress a Folialsův faktor, a to má za následek až 20% rozdíl ve velikosti přípustného defektu.

Současný trend simulačních softwarů se uplatňuje i při predikování chování plošných korozních defektů. Zabývá se jím velký počet vědeckých prací např. [22], které porovnávají simulační metody s experimentem (stress test plynovodního potrubí). Dosažen byl poměrně dobrý rozptyl výsledků, okolo 15 %, a to je samozřejmě příznivé vzhledem k tomu, jak náročná je příprava experimentálního programu oproti numerické situaci. Simulační metody obsahují velké množství zjednodušujících prvků, proto by vzhledem k budoucí bezpečnosti plynovodních systémů neměly nahradit experimentální programy, které lépe předpovídají chování v praxi.

4.2.2 Důlková koroze

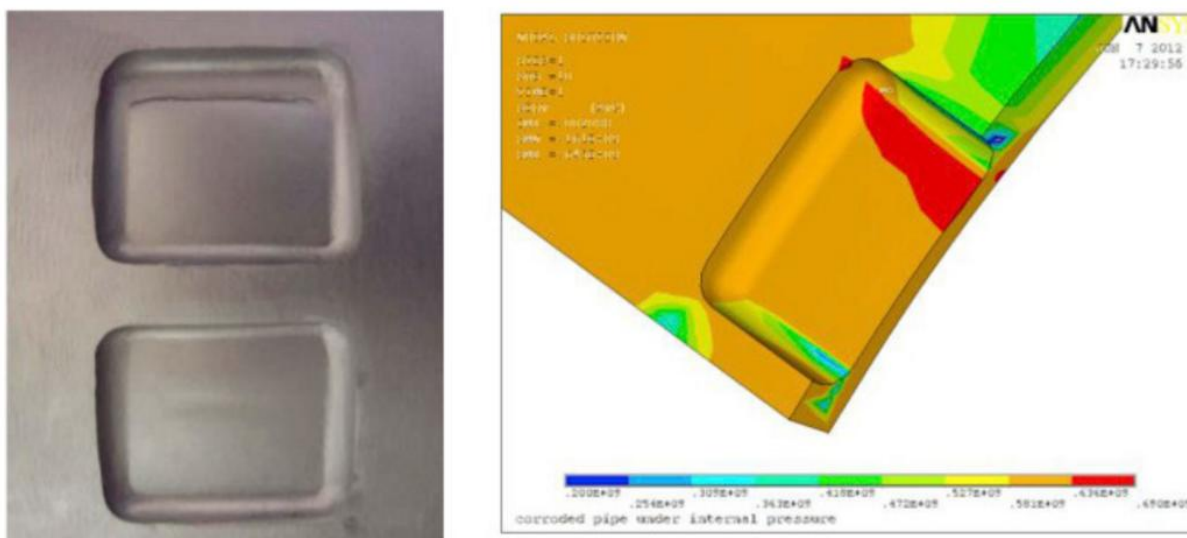
Důlková koroze je v zásadě mnohem nebezpečnější defekt, než je tomu u plošné koroze, protože v místě nejhlubšího důlku dochází k místnímu zvýšení napětí, které může mít za následek protržení ligamentu. Za důlkovou korozi je považován defekt, jehož délka minimálně třikrát převyšuje hloubku a může se objevovat jak na vnitřním povrchu trubky, tak na vnějším povrchu trubky. Na vnitřním povrchu se důlková koroze objevuje v souvislosti s nedostatečným sušením plynovodu před uvedením do provozu nebo vlivem nekvalitního zemního plynu a na vnějším povrchu při porušení proti korozní ochraně. Podle [23] důlkovou korozi ovlivňuje mnohem více faktorů, které dělí do dvou skupin:

- a) konstrukční (tloušťka stěny, průměr a sklon potrubí)
- b) provozní (obsah vody, složení plynu, pevné částice v potrubí, teplota, provozní tlak)

Pro výpočet lomového obvodového napětí se využívá teorie rotačně symetrických desek a nejhlubší důlek se nahrazuje tenkou kruhovou deskou vetknutou do nezeslabené stěny.

Interakce sousedních defektů

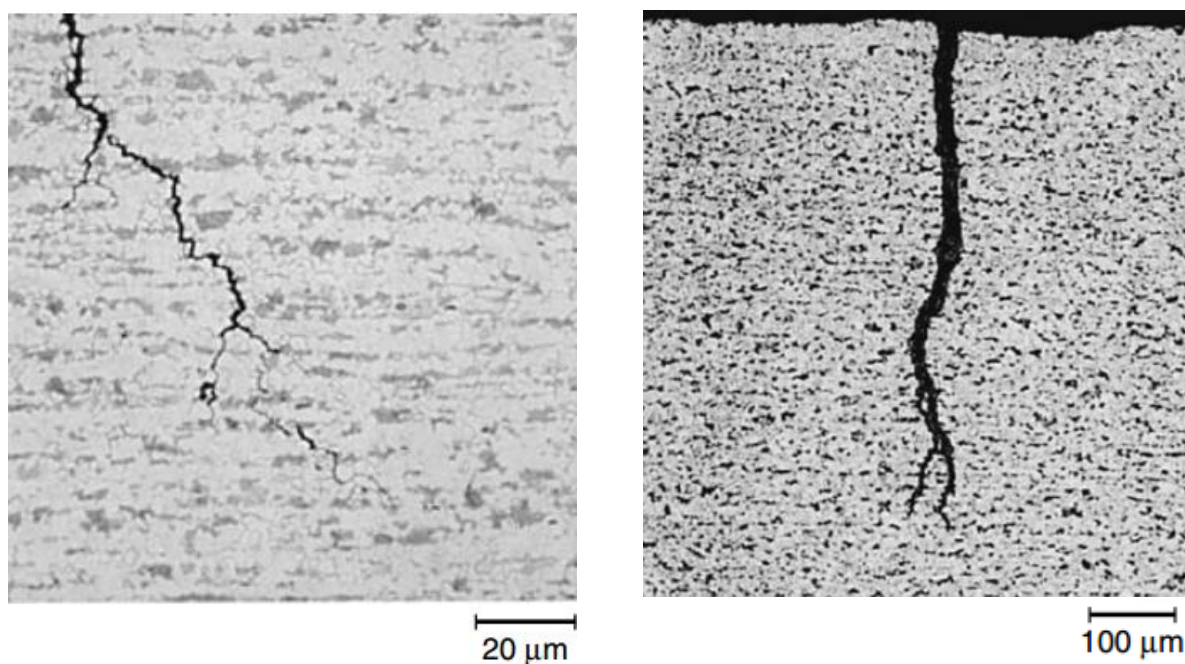
Budou-li se nacházet dva korozní defekty na vzdálenost menší než podélný rozměr jednoho z nich, pak se dle výsledků [24] bude celková výpočtová délka rovnat součtu délek obou poškození a vzdálenosti mezi nimi. V případě obvodově rozmístěných defektů [25], které mají totožné rozměry a leží v ose (Obr. 4.3), tak pokud je jejich obvodová vzdálenost rovna nebo menší než tloušťka stěny dojde k vzájemnému ovlivnění.



Obr. 4.3 Interakce dvou korozních důlků v obvodovém směru [25]

4.2.3 Koroze za napětí

Jedná se o nejnebezpečnější druh korozního poškození, který vnáší poměrně vysoké riziko do spolehlivosti provozu plynovodních potrubí. První zmínky o tomto druhu poškození se objevily koncem 19. století v Indii a jednalo se o mosazné nábojnice tažené za studena, na kterých vznikali trhlinky kolmé k povrchu. Na našem území byla příčinou zatím poslední destrukce plynovodu na Karlovarsku, která si naštěstí nevyžádala žádné lidské životy ani zranění [26].



Obr. 4.4 Mikrostruktura koroze za napětí [27]

Jedná se o velmi specifický druh koroze, který se vyskytuje pouze při existenci dvou základních faktorů. Prvním faktorem je dostatečně vysoké tahové napětí ve stěně tělesa, které může být způsobeno provozním přetlakem, přidavným ohybovým napětím nebo zbytkovým napětím po svařování. Druhým faktorem je účinek agresivního prostředí, podle něhož rozlišujeme korozi: sulfidickou, vodíkovou a čpavkovou. Korozní prostředí je vždy kritické pro určitý materiál, např. pro korozivzdorné oceli jsou nebezpečné chloridy, pro uhlíkové a feritické oceli (nejčastěji využívané pro potrubí) H_2S , NH_3 , SO_2 a CO_2 , pro mosaz NH_3 atd. Podle druhu roztoku a hlavně podle pH roztoku se bude měnit mechanismus růstu trhliny. U roztoků s vysokým pH (alkalický) je trhlina interkrystalická (Obr. 4.4 vlevo), při neutrálním pH je trhlina transkrystalická (Obr. 4.4 vpravo) a při nízkém pH (kyselý) je trhlina kombinací obou mechanismů. V těchto roztocích dochází k chemickým reakcím, při nichž se oddělují atomy vodíku, které následně difundují do intersticiálních poloh mřížky. Vodík se

zachytává v místech tzv. vodíkových pastích. Vodíkové pasti jsou všechny druhy poruch krystalové mřížky, hranice zrn, vměstky a jiné nečistoty. Atomy vodíku se hromadí před čelem trhliny nebo ostrým defektem na dislokacích a tím jim brání v pohybu. Zabráněním pohybu dislokacím neomezují rozvoj plastické deformace před čelem trhliny a v důsledku toho materiál křehne. Zároveň dochází ke shlukování atomů vodíku a k vytváření molekul, které mají mnohonásobně větší velikost než atomy vodíku a tudíž v mřížce vytváří vysoké pnutí, které může vést ke vzniku mikro i makro trhlin [28].

Podle mřížky se mění rozpustnost vodíku v oceli, náchylnější je struktura feritická, odolnější naopak austenitická. Trhlina vzniklá korozí za napětí má charakteristický tvar a hlavní větev je velmi hluboká a větví se na další síťové trhlinky (Obr. 4.4).

4.3 Únavové porušení

Únava je druh porušení materiálu způsobující změnu stavu a vlastností materiálu, který vznikne při působení časově proměnném namáhání. Důvodem řešení únavových porušení je fakt, že k lomu součástí dochází za napětí mnohem menších, než je mez pevnosti materiálu, tudíž není možné se při stanovování životnosti součástí spolehnout pouze na statické výsledky.

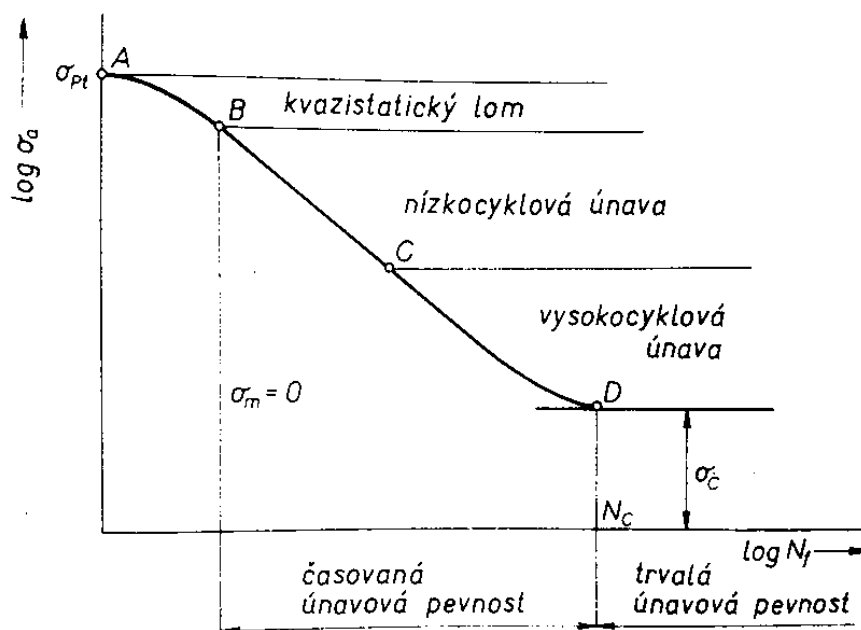
Únava byla poprvé řešena v druhé polovině 19. století, což bylo spojeno s vývojem konstrukcí podrobených únavovým namáháním, jakými jsou ocelové mosty, části podvozků železničních mostů, kolejnic, rozměrných zásobníků plynu, kotlů atd. Řada těchto havárií měla tragické následky, v letech 1860 – 1870 došlo ve Velké Británii k řadě železničních neštěstí, která si vzala přibližně 200 lidských životů. Proto byla snaha laboratoří stanovit mechanické charakteristiky, které by sloužily k výpočtu cyklicky zatěžovaných součástí. První, kdo systematicky prováděl experimenty, byl August Wöhler, podle něhož se dnes jmenuje jedna z nejzákladnějších únavových charakteristik, která udává závislost amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do lomu N_f (Obr. 4.5). Mezi únavy nazýváme vysoký počet cyklů (řádu 10^7), při kterých nedochází k lomu. Tato křivka se v průběhu času rozvíjela a bylo nashromážděno velké množství údajů o vlivu amplitudy, asymetrie cyklu, tvaru součástí a jiných parametrů na únavovou životnost [29].

Únavový proces lze rozdělit do čtyř časově navazujících stadií:

- 1) změna mechanických vlastností
- 2) nukleace mikrotrhliny
- 3) růst únavové trhliny
- 4) únavový lom

První dvě stádia se prolínají a není mezi nimi ostré rozhraní, pro uskutečnění nukleace je nutná koncentrace plastické deformace.

Je užitečné také uvést, že únava se dělí na tři stádia. Pokud se trhлина iniciuje do 100 cyklů, jedná se o kvazistatické poškození, za nízkocyklovou únavu považujeme lom s počtem cyklů do lomu řádu 10^5 a za vysokocyklovou s počtem cyklů do lomu řádu 10^5 a výše (Obr. 4.5) [30].



Obr. 4.5 Wöhlerova křivka [29]

Vlivem různorodosti odběru plynu, odstavky některé z větví, dochází ke kolísání vnitřního přetlaku uvnitř trubky. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou tlaku může být až 10 % u regionálních větví a u magistrálních větví může být ještě větší. Tento rozkmit vnitřního přetlaku je základním předpokladem pro vznik únavového poškození ve stěně potrubí. Při cyklickém namáhání s vysokým středním napětím je velikost amplitudy kolem 5 % středního napětí kritické a může vést k lomu. Nutnou podmínkou je existence ostrého defektu, který lze transformovat v trhlinu [1]. Aby tato trhлина byla schopná růstu (její rychlost $v \neq 0$) musí rozkmit faktoru intenzity ΔK být vyšší než prahová hodnota faktoru intenzity ΔK_p . Po dosažení kritického rozměru dojde k porušení integrity tělesa [31].

$$v = A (\Delta K^m - \Delta K_p^m) \quad (4.4)$$

kde

A a m jsou materiálové konstanty

Kinetika růstu únavových trhlin se u potrubních těles nejběžněji určuje na standardních vzorcích pro stanovování lomové houževnatosti, tzn. na CT vzorcích nebo na vzorcích pro tříbodový ohyb. Vzorky jsou odebrány jak z podélného směru, tak z obvodového směru a u šroubově svařovaných trubek i ve směru podél a kolmo na svarovou housenku. Na těchto vzorcích dojde k nacyklování únavové trhliny pomocí vysokofrekvenčních pulsátorů. Cyklování trhliny probíhá při asymetrii cyklu $R = 0,1$, délka trhliny se nejčastěji sleduje opticky a přírůstek trhliny musí dosáhnout relativní délky $a/w = 0,55$. Růst únavové trhliny se určuje z přírůstku délky trhliny a počtu cyklů dle metody dvojbodové a trojbodové a následně je určena průměrná rychlost růstu trhliny. Rozkmit faktoru intenzity se určuje podle vztahu:

$$\Delta K = \frac{\Delta F \cdot Y}{B \cdot \sqrt{w}} \quad (4.5)$$

$$Y = \sqrt{\frac{a}{w}} \cdot \left[29,6 - 185,8 \cdot \left(\frac{a}{w}\right) + 655,7 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^2 - 1017 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^3 + 638,9 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^4 \right] \quad (4.6)$$

kde

B je tloušťka CT vzorku [mm]

w je šířka CT vzorku [mm]

ΔF je rozkmit síly [F]

Y je kalibrační faktor [-]

a je celková délka trhliny [mm]

Provozní zatížení plynovodu, charakterizované kolísáním vnitřního přetlaku v mezích 0,8 až 1 p_n , kde p_n je nominální přetlak, nemůže vést k iniciaci únavové trhliny a to ani v případě občasného úplného odlehčení [1].

5 Tlaková rehabilitace plynovodu

Některé větve české plynovodní sítě nejsou z technických důvodů uzpůsobeny k vnitřním inspekcím. A to z důvodu chybějících vstupních a výstupních komor nebo z důvodů osazení velmi ostrými částmi oblouků, anebo je jejich znečištění na tak vysoké úrovni, že nelze inspekci realizovat. Dřívější normy byly mnohem benevolentnější a je tedy možné v plynovodních trasách najít různé druhy kovových i nekovových předmětů. Plynovodní potrubí mohou být provozována několik desítek let a je důležité se přesvědčovat o jejich okamžitém stavu a stanovit prognózu další bezpečné provozuschopnosti.

Ani i u plně dostupných plynovodů nelze zaručit, že defekty které jsou na něm detekovány opakovaně při vnitřní inspekci a jejichž charakter je časově neproměnný, že tomu bude i nadále, jelikož může dojít k jakékoliv situaci, která tento defekt uvede k růstu a může dojít k protržení stěny trubky a k nebezpečnému úniku plynu v horším případě k explozi.

Pro predikování chování potrubí byla na základě řady odborných prací [32], [33], [34], [35], [36] aj. do praxe zavedena tzv. rehabilitace plynovodu, která slouží k ověření provozu schopnosti a bezpečnosti potrubí. Jedná se o přetížení potrubí vnitřním přetlakem za účelem přerozdělení napětí ve stěně potrubí. Cílem je dosažení vnitřních napětí I. druhu před čelem ostrých defektů, která způsobují zpomalení nebo v lepším případě úplné zastavení růstu defektu a to hlavně při cyklickém namáhání (kolísání vnitřního přetlaku v potrubí) [37].



Obr. 5.1 Odběr vyříznutého vzorku pro tlakovou zkoušku [38]



Obr. 5.2 Přivaření zaslepovacích den na volné konce po vyříznutí vzorku pro tlakovou zkoušku [39]

Rehabilitace má přesně daný technologický postup, jenž je aplikován na vybraný úsek a skládá se z následujících operací:

1. Vybrání nejvíce poškozeného místa na úseku a to na základě korozního auditu nebo jiného podezření. Tato část potrubí je po oddělení plynovodu ze zbytku plynovodní sítě a odplynění

odstaveného plynovodu, vyříznuta z trasy (ilustrativně zobrazeno na obr. 5.1) a bude podrobena tlakové zkoušce, která bude podrobně popsána v kapitole 5.1.

2. Na zbylé části plynovodu probíhá příprava k tlakové rehabilitaci probíhající ve sledu operací:

Čištění

Po přivaření zaslepovacích den se pokračuje čištěním vnitřního povrchu, které se provádí ježky s gumotextilními nebo polyuretanovými lamelami. Ježek je poháněn v potrubí pomocí tlakového vzduchu z kompresoru a čištění je opakováno tolikrát, dokud není plynovod zbaven všech nečistot, včetně ropných nečistot, které by mohly při vypouštění vody z plynovodu způsobit kontaminaci místní krajiny [39].

Plnění potrubí vodou

Po vyčištění plynovodu dojde k plnění potrubí vodou, která je přiváděna z nejbližších rybníků nebo vodních toků a její kvalita, především agresivita, by měla být ověřena chemickým rozbohem. Rychlost plnění je závislá na typu čerpadla a neměla by překročit 1,5 m/s. Zavzdušnění plynovodu by mělo být co nejnižší, připouští se do 0,5 % max. celkového vnitřního objemu úseku [1].

Tlaková rehabilitace plynovodu

Naplněný plynovod je připraven na řízené přetížení (tlaková rehabilitace) vyvozené hydraulickým přetlakem přibližně na úroveň meze plasticity potrubí. Vlastní tlaková rehabilitace je realizována v prvním cyklu, který se skládá z velmi pomalého zatěžování, které by nemělo překročit 3 bary/min [32], výdrži na požadovaném napětí a následného prudkého poklesu napětí. Druhý stejný cyklus má za účel lineárním průběhem potvrdit správné rozložení napětí ve stěně trubky. Rehabilitačním procesem je vyčerpána částečně plasticita materiálu [1].

Nejdůležitějším parametrem rehabilitace je velikost rehabilitačního napětí, protože nízké napětí nesplní efekt zablokování podkritických defektů a velmi nákladný proces nesplní požadovaný efekt [32], anebo dojde k zhoršení pevnostních vlastností úseku plynovodu z důvodu otevření kritických defektů [32]. Naopak při velmi velkém rehabilitačním napětí dojde k podkritickému růstu defektu, který končí protržením nosného ligamentu a k úniku média. V tomto případě je část potrubí po destrukci nahrazena novým a tlaková reparace se opakuje. V práci [35] poukazují na viskoplastické chování materiálu před čelem trhliny, které se vyznačuje neprotržením ligamentu před čelem trhlín ani v prvním, ani druhém rehabilitačním cyklu, ale až při zkoušce těsnosti, která je u starších plynovodů vyžadována. Tato situace je dána časovým růstem trhliny při konstantním napětí, při němž se materiál chová jako viskózní kapalina. Při zkouškách [40] nárůstu deformace při konstantním napětí

(nizkoteplotní creep) na zkušebních tyčích bylo zjištěno, že vyšší viskózní chování je pozorováno při vyšším napětí. Vztah mezi napětím a nárůstem deformace je parabolický. Nizkoteplotní creep má v tomto případě dvě stádia. První stádium je velmi rychlý nárůst deformace a druhé stádium je pozvolné s malým nárůstem deformace. Při převedení deformace na pokles tlaku v trubním tělese je pozorována změna tlaku až do 18 hodin od začátku zkoušky těsnosti [41].

Tlakovou rehabilitací plynovodu lze odstranit defekty vzniklé technologií výroby trubek (přeložky, šupiny atd.), studené spoje ve šroubovicově svařovaných potrubích, korozně-napěťové trhliny a lokální napětí ve stěně trubky vzniklé při pokládce.

Vytěsnění vody z úseku

Zrehabilitovaný úsek je nutný zbavit vody, což se provádí manžetovým ježkem uloženým předem v potrubí a jeho pohyb je zajištěn vzduchovým kompresorem. Vypouštění vody by mělo být odsouhlaseno vodohospodářským státním orgánem. Volná voda po vypuštění se vytírá manžetovým a posléze polyuretanovým ježkem.

Sušení plynovodu

I po vytření ulpívá na stěně potrubí vodní film, který by bez vysušení mohl způsobit korozi za napětí popisovanou v kapitole 4.2.3. Sušení plynovodu se provádí dvěma způsoby:

- a) extrémně přesušeným vzduchem, který je dmýchán do potrubí s teplotou rosného bodu – 80 °C a tím se voda odpařuje a je vynesena ven
- b) sušení vakuem založené na fyzikálním jevu – poklesem tlaku v potrubí klesá i bod varu a voda se začne vařit při teplotě okolí a je odsáta z potrubí.

Sušení vakuem je mnohem komplikovanější než sušení extrémně přesušeným vzduchem, ale je vhodné i pro tvarově členité úseky [39].

Napojení plynovodu

Vysušený plynovod se napojí na síť podle provozních podmínek a výsledkem rehabilitace je ověření stavu plynovodu a posílení míry bezpečnosti úseku, a v některých případech dojde i k navýšení pracovního tlaku.

5.1 Tlaková zkouška

U nejvíce poškozeného vzorku odebraného z provozovaného potrubí je část použita na ověření materiálových charakteristik a zbyla část na provedení tlakové zkoušky.

V kapitole 2. jsou podrobně popsány všechny materiálové charakteristiky, které na tělese měříme. Materiálové charakteristiky jsou ověřovány z důvodu, že dochované výrobní certifikáty z období výstavby plynovodu nejsou zcela úplné pro dnešní pohled na bezpečnost plynovodu. Chybí zde povětšinou chemické složení použité oceli, hodnoty vrubové a lomové houževnatosti, v některých případech dochází i k prokázání jiného druhu oceli, než byl původním dokumentem deklarován.

Zbylá část vyříznutého tělesa je použita pro tlakovou zkoušku. Těleso musí mít nejmenší délku $7 \times DN$, což zaručí neovlivnění výsledků výztužným efektem den (full-size vzorek). Po očištění vzorku od povrchové úpravy je těleso opatřeno zaslepovacími dny, kde svary provádí školení svářeči provozovatelů plynovodní sítě. Zkušební těleso opatřené zaslepovacími dny je podrobena následujícím kontrolním pracím:

- měření tloušťky stěny
- proměření geometrie tělesa
- vizuální kontrola
- defektoskopická analýza



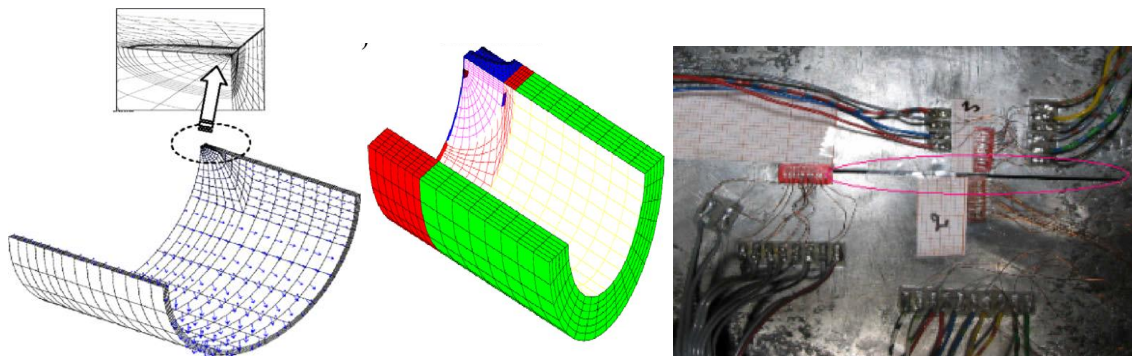
Obr. 5.3 Tlaková zkouška únosnosti záplat [42]



Obr. 5.4 Tlaková zkouška únosnosti obvodových svarů [43]

Na základě kontrolních prací jsou na těleso v okolí nejkritičtějších defektů umístěny tenzometrické snímače, které v průběhu tlakové zkoušky snímají chování defektů. Tenzometrické snímače jsou propojeny kabely se zbytkem aparatury, včetně počítače, jež ukládá data z měření.

Těleso opatřené měřicími tenzometry je umístěno na bezpečné místo pro tlakové zkoušky, nejlépe do speciálních betonových bazénů s odtokem vody, která je vytěsněna z trubky po destrukci. Zkušební těleso umístěné na zkušebním místě je plněno vodou za dodržení přípustného zavzdušnění do 0,5 % max. celkového vnitřního objemu.



Obr. 5.5 Porovnání experimentálních dat a MKP simulací [44]

Tlakovými zkouškami se ověřuje chování defektů při provozním tlaku, jestli dochází k jejich otevírání, popř. jestli se jejich chování mění při cyklickém namáhání. Dále pro určení limitních hodnot napětí pro tělesa s defektem ve svarovém kovu [43] s trhlinou různé geometrie a pro ověření únosnosti záplat [42] nebo objímek [45], [46], [47] na potrubním systému. Tlakové zkoušky se používají také při porovnávání experimentálních dat s MKP (Metoda konečných prvků) simulacemi [44].

6 Praktická část

6.1 Úvod

Při rehabilitaci části plynovodní trasy DN300 byly provozovatelem zjištěny ultrazvukovou metodou četné rozsáhlé trhliny na vnějším povrchu trubky. Nejvíce postižené části byly dodány k prověření chování těchto defektů v návaznosti na provozní tlak ($p = 7,35 \text{ MPa}$), na cyklické zatěžování v případě odstávek a kolísání přetlaku plynu a k provedení tlakové zkoušky s ověřením limitních stavů plynovodu. Dodány byly tři segmenty, dva rovné s nominální tloušťkou stěny $t_r = 10 \text{ mm}$ a jedno koleno s poloměrem ohybu $R = 1000 \text{ mm}$ a nominální tloušťkou stěny $t_k = 15 \text{ mm}$, což je nejspíše dáno zajištěním bezpečnosti. Při výrobě kolen dochází k ztenčení stěny na vnějším průměru a také by mohlo dojít k erozivnímu opotřebení vlivem nečistot uvnitř potrubí [48].

Z těchto tři segmentů byl na základě defektoskopické analýzy vybrán segment s nejmenším postižením defekty a byl použit na výrobu vzorků pro tahovou zkoušku, zkoušku rázem v ohybu a vzorků pro tříbodový ohyb na stanovení lomové houževnatosti. Dále byly z tohoto potrubí vyříznuty vzorky s typickými defekty k metalografickému šetření skutečných délek trhlín, jejich orientaci a případně jejich charakteru. Mimo toto metalografické šetření defektů byl zkoumán typ struktury v podélném a obvodovém směru, velikost zrna, řádkovitost, hloubka oduhličení povrchu a mikročistota struktury použité ocele. Jelikož nebyly k potrubí dodány žádné podklady o chemickém složení, výrobci atd. uskutečnil se chemický rozbor ocele.

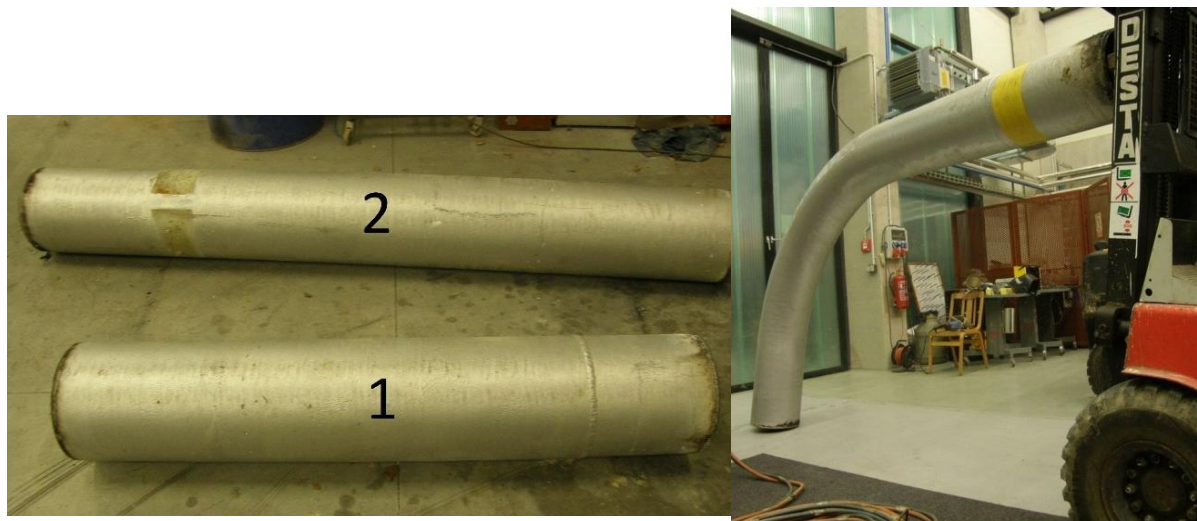
Zbylé dva segmenty byly přivařeny k sobě a opatřeny zaslepovacími dny. U válcovaných trubek, o jaké se jedná v této praktické části, je velmi pravděpodobný výskyt lokálního ztenčení stěny trubky, a proto byla u zkušebního tělesa prověřena tloušťka stěny pomocí ultrazvukového měřiče. Po stanovení velikosti defektů a tloušťky stěny byla nejkritičtější místa opatřena tenzometry. Připravené těleso bylo podrobena samotné tlakové zkoušce, při níž bylo sledováno chování defektů v závislosti na vnitřním přetlaku, zda dochází k růstu defektů při únavovém zatěžování odpovídajícím opakovaným náběhům na provozní tlak. Kontinuálním zatěžováním vnitřním přetlakem do destrukce byly vyhodnoceny podmínky růstu defektů ve zkušebním tělese. Po destrukci tělesa došlo k fraktografické analýze lomové plochy vyříznuté z trubního tělesa.

Na experimentu se podílely tyto instituce:

SVÚM a.s. založená v roce 1994 a to privatizací bývalého Státního výzkumného ústavu materiálu v Praze (SVÚM). Tento ústav byl založen již v roce 1949 a postupně se vypracoval v přední centrum výzkumu v oblasti kovových materiálů, plastů a jejich zkoušení. Společnost SVÚM a.s. je

privátní výzkumnou organizací, jejíž hlavní činností je výzkum a vývoj kovů, plastů, kompozitů a zkoušení jejich vlastností v akreditovaných laboratořích.

NET4GAS, s.r.o. založená v roce 2006 po rozdělení společnosti RWE Gas, která provozuje více než 3800 km dlouhou plynovodní síť přes Českou republiku s přepravním výkonem okolo 45 miliard m³ za rok. Zaměstnává více než 500 zaměstnanců, kteří se podílejí na bezpečných a plynulých dodávkách zemního plynu k jejich uživatelům.



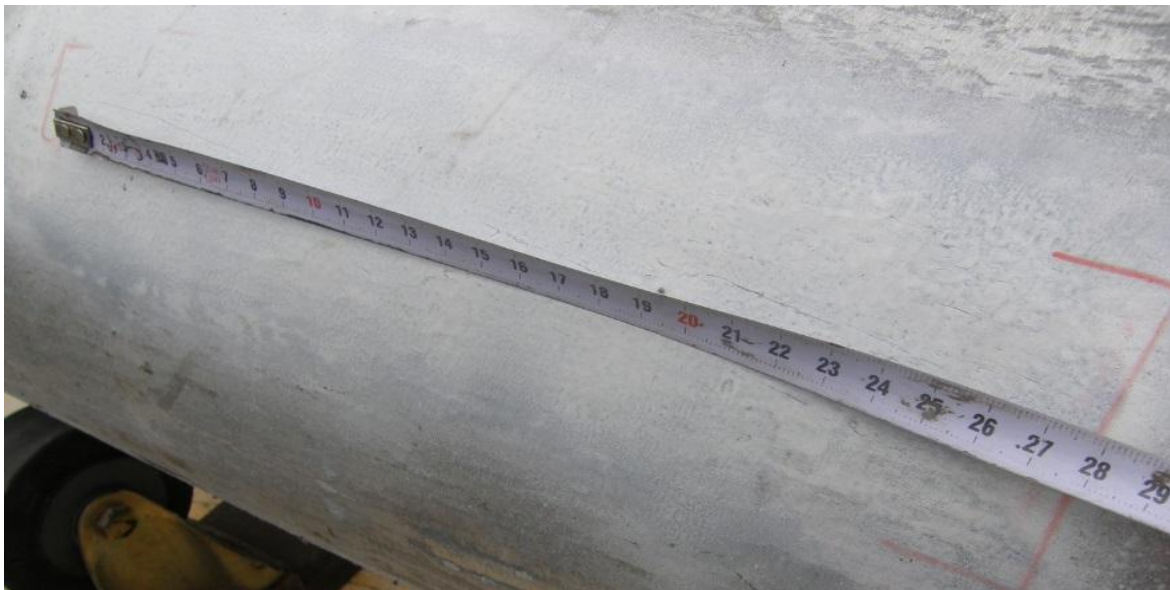
Obr. 6.1 Dodané segmenty potrubí DN300

6.2 Defektoskopická analýza

Prověření četnosti defektů a jejich umístění bylo provedeno magnetickou práškovou metodou na všech třech dodaných segmentech a cílem bylo vybrat dva ze tří segmentů pro tlakovou zkoušku a jeden ponechat na materiálové zkoušky a metalografické šetření charakteru trhlin.

Magnetická prášková metoda slouží k zviditelnění povrchových a podpovrchových necelistvostí. Principem metody je nanesení jemného magnetického prášku na povrch analyzovaného tělesa a zmagnetizování povrchu s naneseným práškem. Pokud je ve zmagnetizovaném kusu necelistvost přibližně kolmá na směr magnetického pole, dochází v okolí vady k deformaci siločar, které nad vadou částečně vystupují nad povrch a vytváří tzv. magnetické rozptylové pole vady a jsou indikátorem trhlin [49].

Očištěné segmenty od ochranné barvy byly podrobeny defektoskopické analýze, bylo nalezeno 71 indikací trhlin povětšinou orientované podélným směrem. Nejdelší vada byla nalezena na potrubním tělese 1 a dosahovala délky cca 270 mm, zdokumentovaná na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Nejdelší trhlina na potrubním tělese 1

Na základě defektoskopické analýzy bylo pro tlakovou zkoušku vybráno potrubní těleso 1, jelikož obsahovalo z rozměrového hlediska nejkritičtější trhlinu a koleno, které bylo vybráno na základě odlišného tenzoru napjatosti ve stěně.

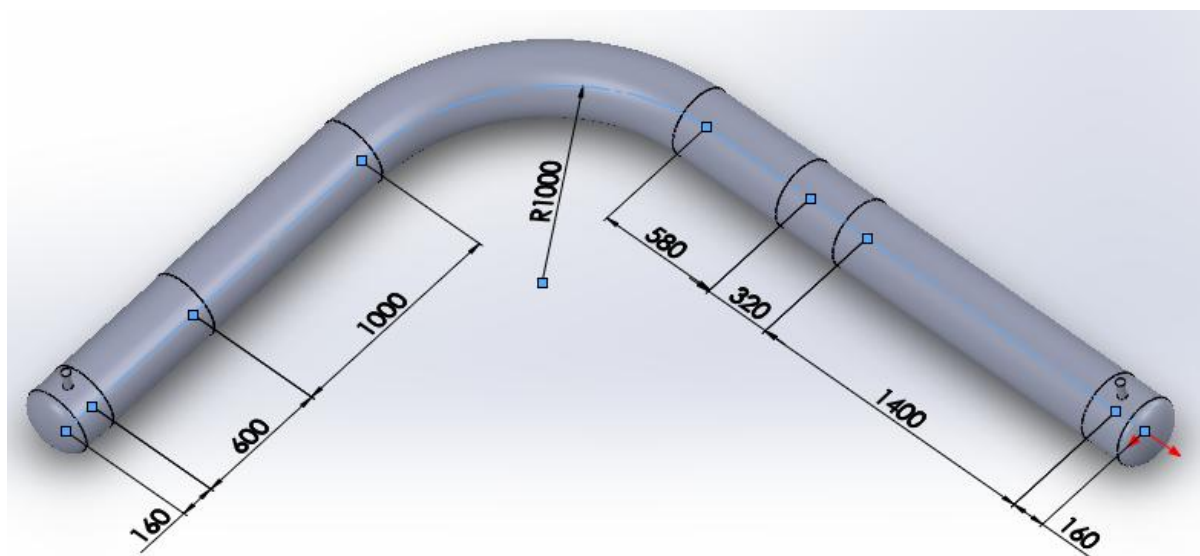
Tyto dva segmenty byly zkušebními svářeči z provozovatelské společnosti svařeny ručním elektrickým obloukovým svařováním k sobě a také opatřeny zaslepovacími dny. Tak byla celá soustava připravená k proměření geometrie tělesa, tloušťky stěny a následné tlakové zkoušce (Obr. 6.3).



Obr. 6.3 Dva svařené segmenty DN300 se dny pro tlakovou zkoušku

6.3 Proměření geometrie tělesa

Těleso bylo podrobena proměření základní geometrie (základní délkové rozměry jsou okótovány na obr. 6.4), dále těleso bylo podrobena vizuální kontrole vnějšího povrchu. Vizuálně povrch tělesa nevykazoval žádné necelistvosti povrchu, místa s výraznou odchylkou od kruhového průměru a ani boule nebo jiné projevy způsobené třetí stranou.



Obr. 6.4 Rozměry základní geometrie tělesa

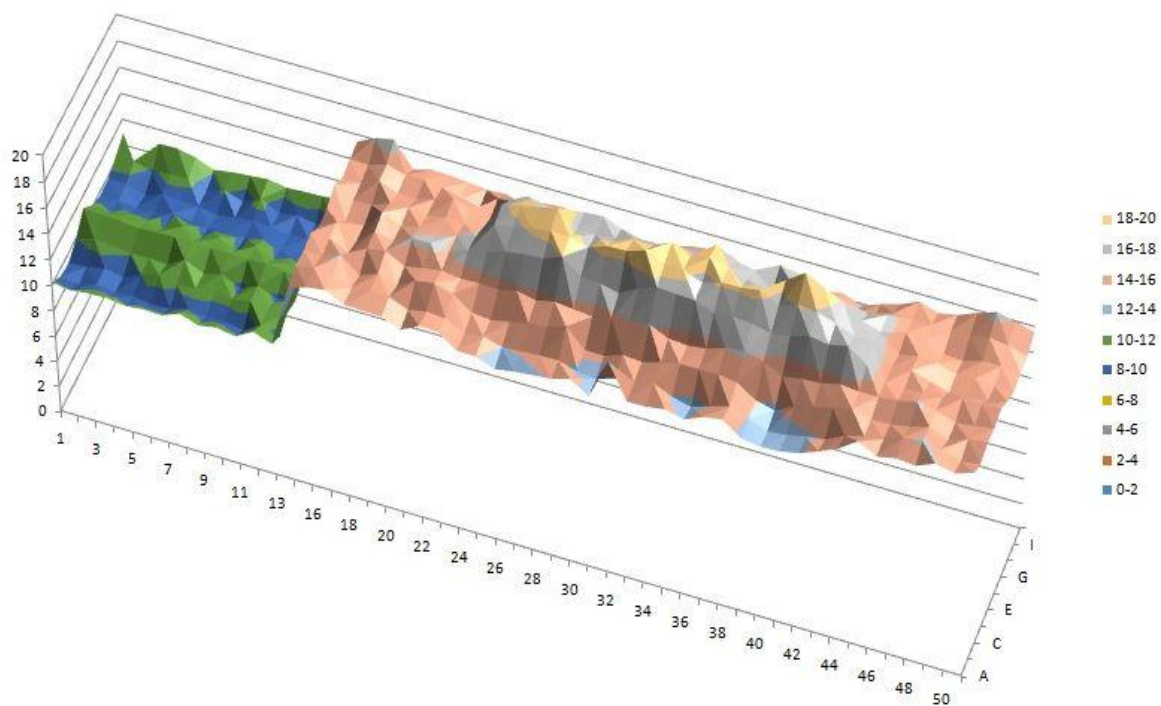
6.4 Měření tloušťky stěny

Měření tloušťky stěny bylo provedeno ultrazvukovou metodou v síti o velikosti čtverce 100 x 100 mm (v oblasti ohybu byla dodržována podélná vzdálenost 100 mm v síti na vnějším rádiu, na vnitřním rádiu tak byla podélná vzdálenost mezi měřícími body menší). Grafické rozdělení tloušťky stěny je uvedeno na obr. 6.5.

Písmena A – J označují pozici po obvodu. Řady 1 – 13 označují pozici měření po délce trubky, řada č. 14 odpovídá svaru (měření nebylo provedeno), řady 15 – 51 označují pozici měření na koleni.

Z obr. 6.5 je vidět, že tloušťka stěny v koleni je podstatně větší než u rovného segmentu. V průměru je tato tloušťka větší asi o 5 mm. Nejmenší naměřená tloušťka 9,28 mm byla zjištěna na pozici B2.

Kompletní výsledky měření jsou uvedeny v tab. 6.1, tučně je v tabulce označena nejnižší hodnota tloušťky stěny, která dosahovala 9,28 mm. Stěna trubky je ztenčena o 7,2 % nominální tloušťky stěny.



Obr. 6.5 Grafické znázornění výsledků měření tloušťky stěny (tmavě modrá vyznačená oblast s nejmenší tloušťkou stěny) [48]

Tab. 6.1 Výsledky měření tloušťky stěny

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	10,23	9,45	9,29	9,98	11,12	10,13	9,69	9,79	10,36	10,91
2	10,04	9,28	9,39	10,39	11,02	10	9,73	9,77	10,35	V místě se nachází nátrubek
3	10,2	9,7	9,7	10,22	10,96	10,15	9,52	9,28	9,92	10,9
4	10,27	9,48	9,37	10,05	10,79	10,09	9,59	9,82	10,16	10,93
5	10,06	9,54	9,99	10,09	10,87	9,98	9,92	9,7	10,2	10,64
6	10,21	9,34	10,43	10,01	10,92	10,51	9,68	9,63	9,66	10,06
7	10,15	9,44	10,12	10,78	10,93	10	9,66	9,38	10,09	10,3
8	10,7	9,82	10,16	10,13	10,89	10,42	9,74	9,57	9,61	10,42
9	10,2	9,64	10,15	10,48	10,88	9,92	9,72	9,74	10,24	10,55
10	10,45	9,65	10,17	9,78	10,8	10,63	9,96	9,66	9,53	10,3
11	10,18	9,4	10,42	10,38	10,89	9,99	9,69	9,45	9,77	10,38
12	10,96	10,24	10,31	9,81	10,72	10,14	9,58	9,57	9,5	10,43
13	10,42	9,74	10,34	10,02	10,55	9,91	9,55	9,63	9,98	10,57
14	V místě se nachází svar									
15	15,22	15,65	15,6	15,78	15,04	15,16	15,78	15,1	15,34	15,46
16	15,66	15,92	15,66	15,72	15,74	14,63	14,96	15,09	15,28	16,15
17	15,86	15,65	16,08	15,04	14,68	14,66	15,02	15,68	15,74	16,43
18	15,14	15,24	14,93	15,78	15,84	16,08	15,58	15,09	15,32	14,53
19	15,1	15,4	15,48	15,99	15,52	15,46	15,66	15,12	15,38	14,92
20	15,04	15,36	14,93	15,22	16,15	15,77	15,46	15,48	15,16	14,88
21	14,46	14,75	15,76	15,5	16,18	15,88	15,72	15,94	14,78	14,75
22	15,19	15,05	15,98	15,69	15,95	15,98	15,66	15,44	14,43	14,58
23	15,12	14,91	15,56	15,51	16,38	16,26	15,48	15,29	15,54	14,68
24	14,1	14,21	14,55	15,56	16,74	17,6	17,88	16,97	15,79	14,17
25	14,09	14,37	14,39	15,5	17,17	17,79	18,25	17,74	15,91	14,78
26	13,52	13,98	14,68	15,79	17,39	18,15	18,52	17,09	15,93	14,91
27	13,76	14,06	14,99	15,52	17,47	18,35	18,82	16,96	15,18	14,64
28	13,91	14,16	15,14	15,81	18,03	18,29	17,66	17,74	15,41	14,85
29	14,05	14,2	15,56	15,65	16,93	17,92	17,66	17,83	15,42	14,38
30	14,45	13,75	14,18	15,5	16,82	18,42	17,74	17,29	15,39	14,14
31	13,53	13,62	14,14	15,81	16,48	18,47	18,11	16,9	15,34	14,1
32	16,64	14,06	14,64	15,98	17,28	18,9	18,03	16,91	15,57	14,1
33	13,97	14,23	14,5	16,16	17,75	18,27	18,71	16,8	15,83	14,72
34	14	14,58	14,89	15,5	17,64	18,26	18,07	16,9	15,93	14,89
35	14,22	13,93	15,19	15,37	17,57	17,69	18,43	18,13	15,53	14,87
36	13,87	13,57	15,23	15,55	17,05	18,13	18,05	17,3	15,28	14,1
37	14,5	14,04	15,24	16,02	17,2	18,14	17,55	17	14,97	13,97
38	14,71	14,48	15,03	16,24	17,04	18,36	17,2	15,96	16,58	14,36
39	13,68	13,95	14,1	15,81	16,7	17,57	18,3	16,76	16,32	13,46
40	13,47	13,36	13,72	15,09	16,92	18,07	19,27	17,19	15,46	13,62
41	13,53	13,52	14,45	15,34	17,35	17,95	18,57	16,6	15,28	14,41
42	13,82	13,85	14,83	15,42	17,11	17,47	17,89	16,28	14,45	13,86
43	14,39	14,04	15,2	15,75	17,43	16,97	16,87	16,19	14,69	14,38
44	15,03	14,78	15,56	15,63	16,43	16,79	16,43	16,48	15,35	14,8
45	16,04	15,14	15,13	15,61	15,47	15,43	15,11	15,54	15,29	15,42
46	15,28	15,36	15,2	15,77	15,37	15,6	15,42	15,39	15,33	14,95
47	15,58	15,94	15,46	16,08	15,59	15,11	15,29	14,69	15,21	15,23
48	15,45	16,07	15,89	15,86	15,66	14,73	14,83	14,63	15,27	15,79
49	16,04	15,9	15,32	15,33	15,96	14,81	14,93	15,02	15,56	16,29
50	15,73	15,35	15,82	15,52	15,91	14,92	14,75	15,06	15,39	15,98
51	16,18	15,57	15,94	15,77	16,02	15,28	14,68	14,92	14,96	15,56

6.5 Chemický rozbor

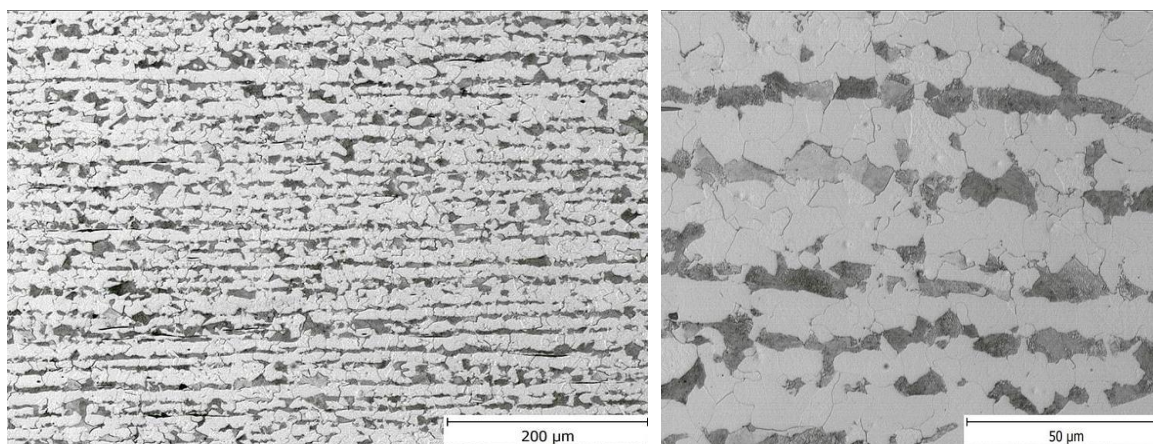
Chemický rozbor byl proveden opticko - emisním spektrometrem typu SPECTROMAXx na výřezku z trubního tělesa 2. Základní prvky jsou zaznamenány v tab. 6.2. Dále byl stanoven uhlíkový ekvivalent $C_{ekv} = 0,44$ hm. %. Podle uvedeného chemického složení se jedná o ocel 13 126 [50] používanou pro vysokotlaké plynovody.

Tab. 6.2 Obsahy základních prvků

Vzorek	Obsahy prvků [hm.%]					
	C	Si	Mn	Cu	P	S
DN300-2	0,19	0,34	1,29	0,2	0,028	0,022

6.6 Metalografický rozbor základního materiálu

Metalografický rozbor struktury materiálu byl proveden na optickém mikroskopu Neophot 32 v podélném i obvodovém směru. Mikročistota [51] obou trubek je průměrná, výskyt vměstků je poměrně malý, stupeň 1 – 1,5, pro sulfidické i oxidické vměstky. Struktura je jemnozrná feriticko - perlitická s poměrně výraznou řádkovitostí viz obr. 6.6 (levá část zvětšení 100x, pravá část zvětšení 200x, leptáno 4% Nitalem). Velikost zrna [52] odpovídá vzoru 7,5 - 8. Oduhličení povrchu nebylo pozorováno.



Obr. 6.6 Řádkovitá feriticko - perlitická struktura trubky DN300

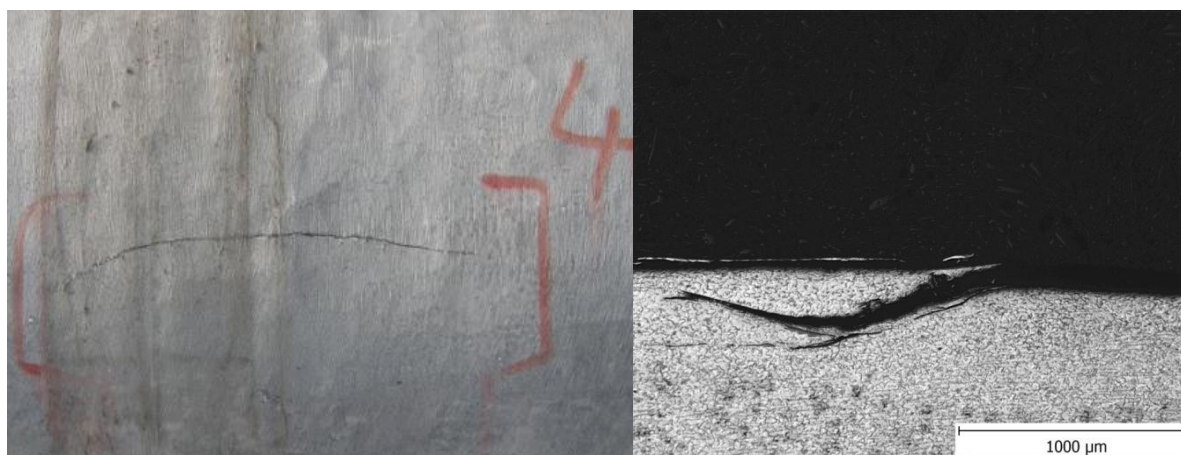
6.7 Metalografický rozbor trhlin na trubce č. 2

Metalografický rozbor trhlin na trubce č. 2 byl proveden na optickém mikroskopu Neophot 32. Jednotlivé řezy byly vedeny kolmo na směr trhlin a to u indikací č. 2, 4, 7, 12, 19 (dva řezy označené A a B), 20, 25 a 32 (dva řezy označené A a B). Následující obrázky dokládají fotografie výše uvedených indikací z NDT spolu s obrázky z metalografických výbrusů na řezech spolu s komentářem k nalezeným defektům.



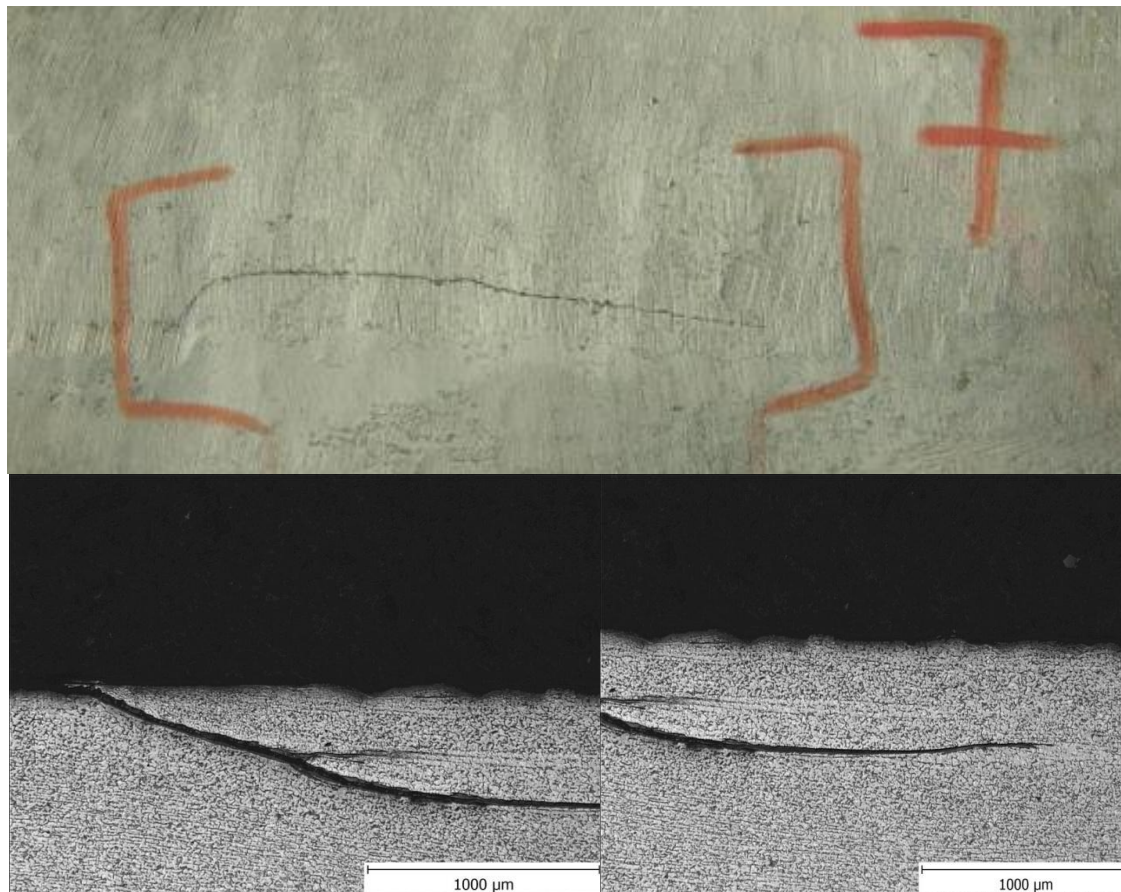
Obr. 6.7 Indikace č. 2

V oblasti indikace č. 2 byla nalezena jedna trhlina levá část obr. 6.7, která zasahovala do hloubky 252 μm zobrazena na pravé části obr. 6.7 (zvětšeno 51,2x, leptáno 4% Nitalem). Uvnitř trhliny není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů, pouze zbytky korozních produktů z provozu. Směr trhliny se stáčí směrem k povrchu.



Obr. 6.8 Indikace č. 4

V oblasti indikace č. 4 byla nalezena jedna trhlina levá část obr. 6.8, které zasahovala do hloubky 347 μm zobrazena na pravé části obr. 6.8 (zvětšeno 25,6x, leptáno 4% Nitalem). Uvnitř trhliny není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů, pouze zbytky korozních produktů z provozu. Směr trhliny se po dosažení nejvyššího místa stáčí směrem k povrchu.



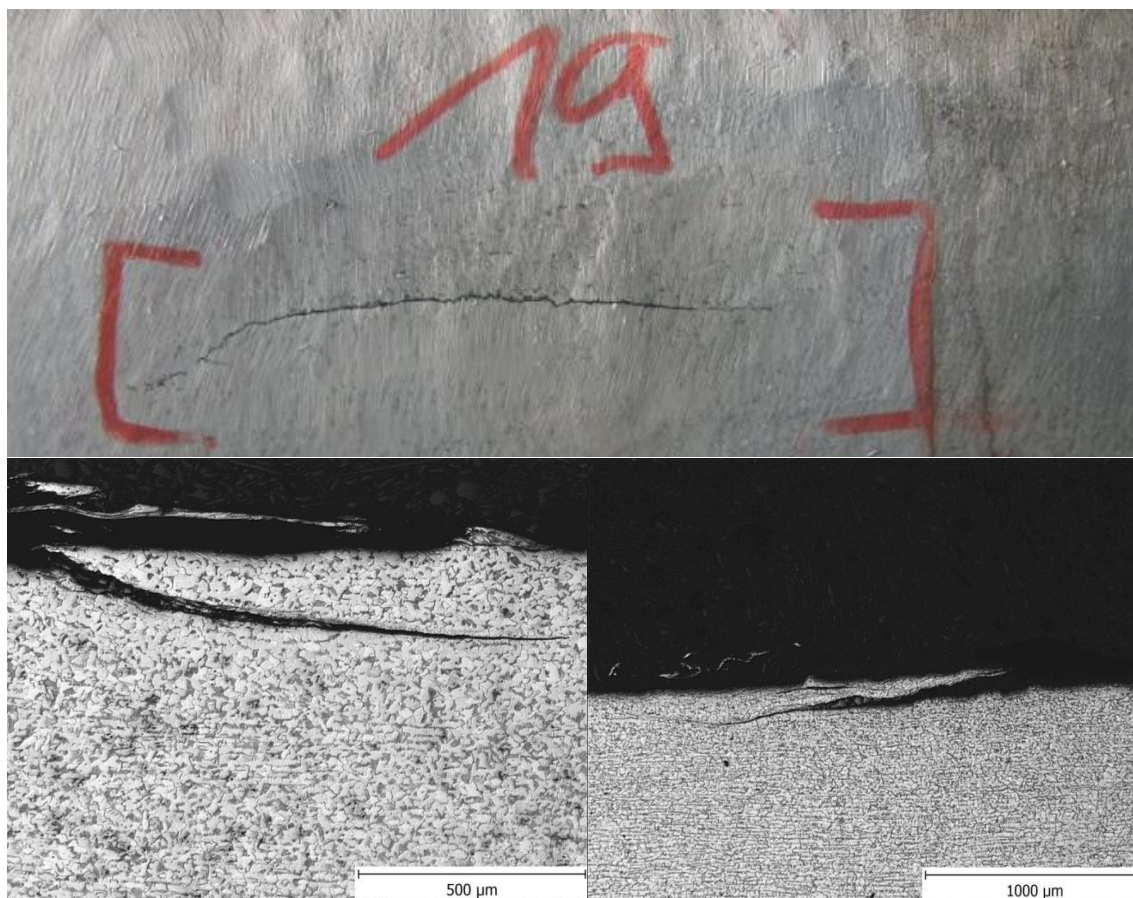
Obr. 6.9 Indikace č. 7

V oblasti indikace č. 7 byla nalezena jedna trhlina horní část obr. 6.9, které zasahovala do hloubky 553 μm zobrazena na dolní části obr. 6.9 (zvětšeno 25,6x, leptáno 4% Nitalem). Uvnitř trhliny není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů či oxidů. Směr trhliny se stáčí směrem k povrchu.



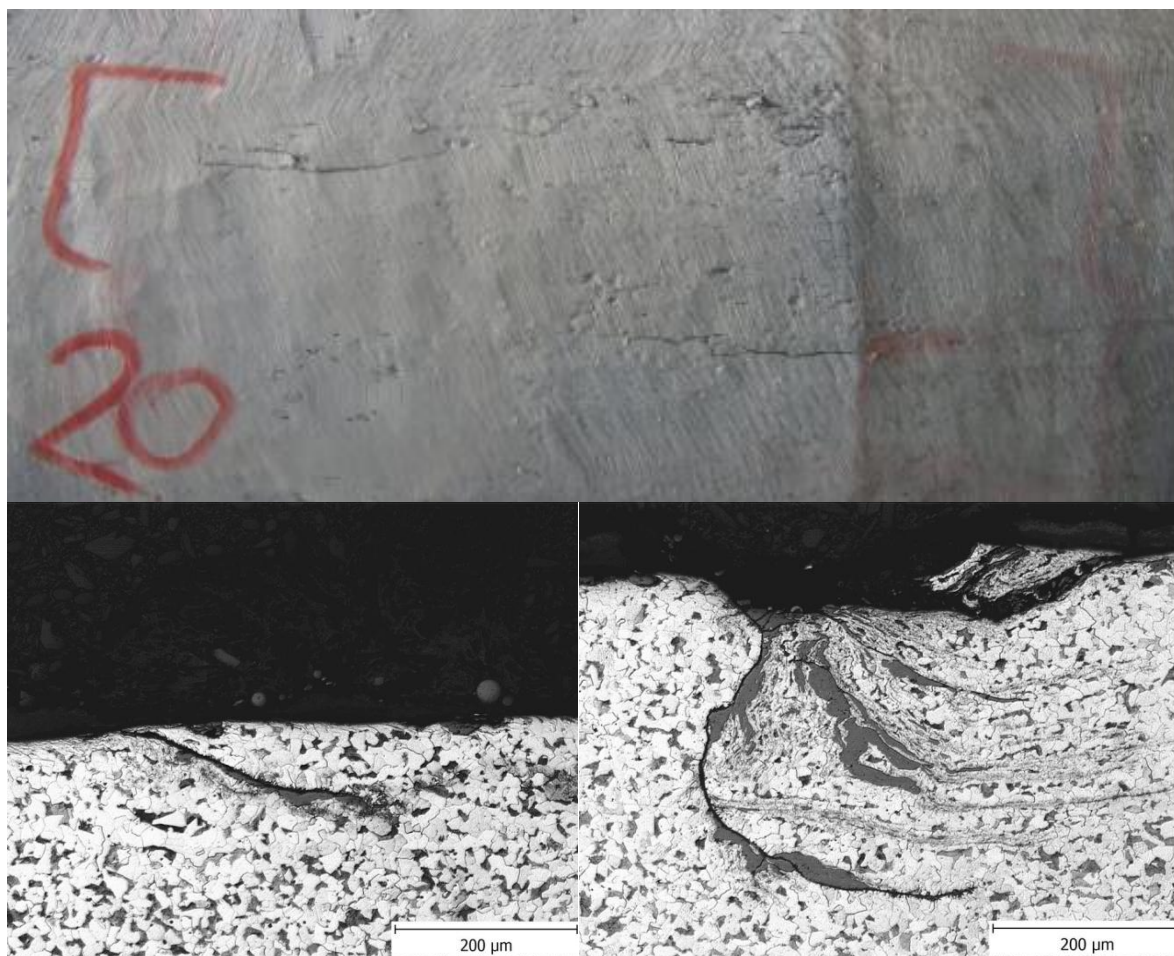
Obr. 6.10 Indikace č. 12

V oblasti indikace č. 12 byla nalezena jedna trhлина levá část obr. 6.10, které zasahovala do hloubky 259 µm zobrazena na pravé části obr. 6.10 (zvětšeno 25,6x, leptáno 4% Nitalem). Uvnitř trhliny není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů či oxidů. Směr trhliny se stáčí rovnoběžně k povrchu.



Obr. 6.11 Indikace č. 19

V oblasti indikace č. 19 byla nalezena jedna trhлина horní část obr. 6.11, která byla zkoumána ve dvou řezech a naměřená hloubka dosahovala 158 a 208 μm zobrazena na spodní části obr. 6.11 (levá část zvětšení 51,2x, pravá část zvětšení 25,6x, oba výbrusy leptány 4% Nitalem). Uvnitř trhliny není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů či oxidů. Směr trhliny se stáčí rovnoběžně k povrchu.



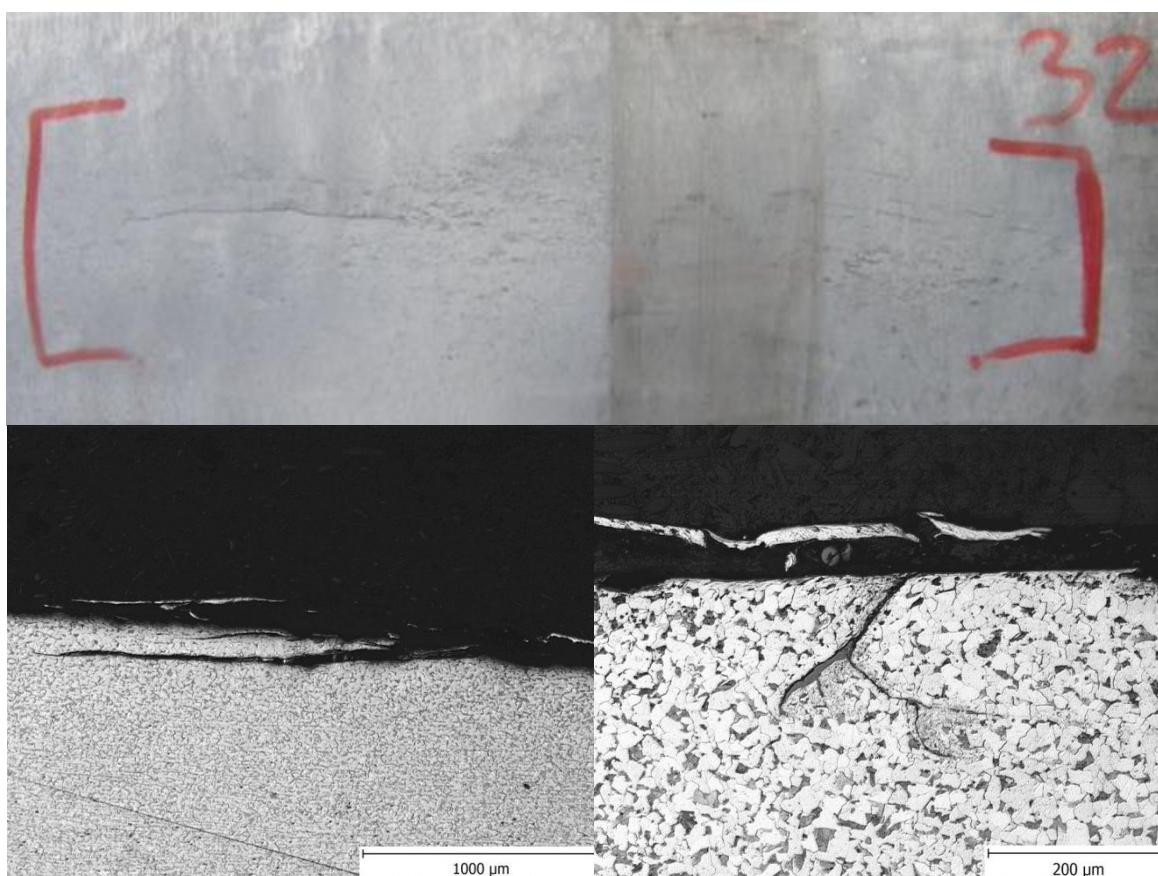
Obr. 6.12 Indikace č. 20

V oblasti indikace č. 20 byla nalezena jedna trhлина horní část obr. 6.12, která byla zkoumána ve dvou řezech a naměřená hloubka dosahovala 95 a 341 μm zobrazena na spodní části obr. 6.12 (zvětšeno 100x, leptáno 4% Nitalem). Uvnitř trhlín není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů, pouze zbytky korozních produktů z provozu. Směr trhlín se stáčí rovnoběžně k povrchu.



Obr. 6.13 Indikace č. 25

V oblasti indikace č. 25 byla nalezena jedna trhлина levá část obr. 6.13, které zasahovala do hloubky 262 μm zobrazena na pravé části obr. 6.13 (zvětšeno 25,6x, leptáno 4% Nitalem). Uvnitř trhliny není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů či oxidů. Směr trhliny je rovnoběžný s povrchem.



Obr. 6.14 Indikace č. 32

V oblasti indikace č. 32 byla nalezena jedna trhlina horní část obr. 6.14, která byla zkoumána ve dvou řezech a naměřená hloubka dosahovala 173 a 202 μm zobrazena na spodní části obr. 6.14 (levá část zvětšení 25,6x, pravá část zvětšení 100x, oba výbrusy leptány 4% Nitalem). Uvnitř trhliny není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů, pouze zbytky korozních produktů z provozu. Směr trhliny na levé dolní části obr. 6.14 se stáčí rovnoměrně s povrchem. Směr trhliny na pravé dolní části obr. 6.14 svírá s povrchem zhruba 60°.

Nejhlubší trhlina dosahovala hloubky 553 μm , což je 5,5 % tloušťky stěny trubky.

6.8 Zkoušky tahem

Zkouška tahem za laboratorní teploty [53] byla provedena na zkušební stroji Instron 1185 s rychlostí zatěžování 5 mm/min. Vzorky byly odebrány z potrubního tělesa 2 v podélném a obvodovém směru. Vzorky odebrané z obvodového směru byly rovnány na lisu EUS 40 a rovinnost vzorku byla kontrolována přiložením na broušenou podložku.

Tab. 6.3 Rozměry zkušebních tyčí před a po zkoušce

Označení vzorku	Směr odběru vzorku	Rozměry zkušební tyče							
		před zkouškou				po zkoušce			
		a_0	b_0	S_0	L_0	a_U	b_U	S_U	L_U
		[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm]
T 1	podélný	9,95	25,01	248,85	90,0	5,87	18,68	109,65	110,6
T 2		9,97	24,97	248,95	90,0	5,40	18,46	99,68	110,1
T 3	obvodový	10,11	25,00	252,75	90,0	6,82	19,68	134,22	112,7
T 4		10,08	24,97	251,70	90,0	7,16	19,80	141,77	109,0

Tab. 6.4 Výsledky tahové zkoušky

Označení vzorku	$F_{p0.2}$	$F_{t0.5}$	F_{eH}	F_{eL}	F_m	$R_{p0.2}$	$R_{t0.5}$	R_{eH}	R_{eL}	R_m	A	Z
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
T 1			108,0	107,5	147,3			434	432	592	22,9	55,9
T 2			104,6		146,8			420	418	590	22,3	60,0
T 3	97,4	99,0			149,6	385	392			592	25,2	46,9
T 4	94,1	97,5			147,1	374	387			584	21,1	43,9

Mez kluzu pro podélný směr je $R_{eH} = 427$ MPa a pro obvodový směr je $R_{p0.2} = 379$ MPa, rozptyl hodnot meze kluzu je způsoben částečným vyčerpáním plasticity při rovnání vzorků. V obou směrech byla dodržena minimální předepsaná mez kluzu ($R_e = 305$ MPa) pro materiál 13 126 [50]. Mez pevnosti pro podélný směr je $R_m = 591$ MPa a pro obvodový směr je $R_m = 588$ MPa, rozptyl hodnot je

zanedbatelný. V obou směrech byla dodržena minimální mez pevnosti ($R_m = 460$ MPa) pro materiál 13 126 [50]. V obou směrech byl také dodržen minimální požadavek na tažnost ($A = 21\%$).

6.9 Zkoušky rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu [12] byla provedena na vzorcích odebraných v podélném (označené v R1 – R3) a obvodovém směru (označené R4 – R6), vždy po třech vzorcích v každém směru. Zkouška byla provedena při teplotě 0 °C na rázovém kladivu PSWO30 s největší rázovou prací 300 J.

Tab. 6.5 Rozměry zkušebních tělísek a výsledky zkoušky rázem v ohybu

Označení vzorku	Směr odběru vzorku	Zkuš. teplota	w	h	S_0	KV_2	KV_2
		[°C]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[J]	[J]
R 1	podélný	0	9,02	8,02	0,723	85	
R 2			9,00	8,02	0,722	66	74
R 3			9,03	8,01	0,723	71	
R 4	obvodový		8,01	7,97	0,638	37	
R 5			8,01	7,98	0,639	38	38
R 6			8,03	8,01	0,643	37	

Výsledky zkoušky rázem byly určeny hodnoty pro podélný směr 74(64) a obvodový směr 38(37), z čehož vyplývá, že materiál 13 126 [50] nevyhověl technickým dodacím podmínkám pro ocelové trubky třídy B [54], které předepisují ve směru příčném k ose trubky hodnoty minimálně 40(30). Jedná se tedy o nedodržení minimální průměrné hodnoty, což vzhledem k ostatním dobrým výsledkům není tak kritické.

6.10 Zkoušky lomové houževnatosti

Zkouška lomové houževnatosti [55], [56] byla provedena na vzorcích odebraných v podélném (označeny LH 1 – LH3) a obvodovém směru (označeny LH 4 – LH6), vždy po třech vzorcích v každém směru. Vzorky byly vyrobeny z výřezků ze stěny trubky a posléze rovnány na stroji EUS 40, následným frézováním a broušením byly vyrobeny vzorky pro tříbodový ohyb (3PB), které byly zkoušeny při teplotě 0 °C. Únavové trhliny byly nacyklovány na zkušebním stroji Amsler HFP45 a vlastní zkouška lomové houževnatosti byla provedena na zkušebním stroji Instron 1196.

Příklad výpočtu lomové houževnatosti pro vzorek LH 1 (viz. vztahy 6.1 – 6.15):

Pozn.: rozměry tělíska pro tříbodový ohyb jsou shrnuty v tab. 6.6

Výpočet faktoru intenzity pro rovinnou deformaci:

Výpočet tvarového součinitele Y :

$$Y = \frac{3 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left\{ 1,99 - \left(\frac{a}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{W}\right) \cdot \left[2,15 - 3,93 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) + 2,7 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right] \right\}}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{a}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (6.1)$$

$$= \frac{3 \cdot \left(\frac{0,01262}{0,02484}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left\{ 1,99 - \left(\frac{0,01262}{0,02484}\right) \cdot \left(1 - \frac{0,01262}{0,02484}\right) \cdot \left[2,15 - 3,93 \cdot \left(\frac{0,01262}{0,02484}\right) + 2,7 \cdot \left(\frac{0,01262}{0,02484}\right)^2 \right] \right\}}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{0,01262}{0,02484}\right) \cdot \left(1 - \frac{0,01262}{0,02484}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

= 2,70

Výpočet provizorní hodnoty lomové houževnatosti K_Q :

$$K_Q = \frac{F_Q \cdot L \cdot Y}{B \cdot W^{\frac{3}{2}}} = \frac{10\,009 \cdot 0,1270}{1000000 \cdot 0,00892 \cdot 0,02484^{\frac{3}{2}}} = 75,66 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}} \quad (6.2)$$

kde

F_Q je specifická síla odečtená ze záznamu [N]

L je rozteč podpor [mm]

Y je tvarový součinitel [-]

B je tloušťka zkušebního tělíska [mm]

W je šířka zkušebního tělíska [mm]

Podmínky stanovení lomové houževnatosti ve stavu rovinné deformace tzn. $K_Q = K_{Ic}$

$$a \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_Q}{R_e}\right)^2 = 2,5 \cdot \left(\frac{75,7}{427}\right)^2 = 0,07857 \text{ m} \quad (6.3)$$

$0,01262 \geq 0,07857 \Rightarrow$ podmínka není splněna

$$B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_Q}{R_{eH}}\right)^2 = 2,5 \cdot \left(\frac{75,7}{427}\right)^2 = 0,07857 \text{ m} \quad (6.4)$$

$0,00892 \geq 0,07857 \Rightarrow$ podmínka není splněna

$$(W - a) \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_Q}{R_{eH}} \right)^2 = 2,5 \cdot \left(\frac{75,7}{427} \right)^2 = 0,07857 \text{ m} \quad (6.5)$$

$$(W - a) = 0,02484 - 0,01262 = 0,01222 \text{ m}$$

$$0,01222 \geq 0,07857 \Rightarrow \text{podmínka není splněna}$$

Tab. 6.6 Rozměry zkušebních tělísek a hodnoty lomové houževnatosti za rovinné deformace

Označení vzorku	Síla F_Q	Celková délka trhliny a	Tloušťka tělesa B	Šířka tělesa W	Rozteč podpor L	Tvarový faktor Y	Provizorní hodnoty lomové houževnatosti K_Q
	[N]	[m]			[-]	[MPa.m ^{0,5}]	
LH1-1	10009	0,01262	0,00892	0,02484	0,1	2,64168	75,7
LH1-2	6856	0,01500	0,00861	0,02475	0,1	3,23211	66,1
LH1-3	8159	0,01400	0,00862	0,02487	0,1	2,52026	60,8
LH1-4	5532	0,01537	0,00863	0,02488	0,1	2,6105	42,6
LH1-5	7323	0,01371	0,00863	0,02483	0,1	2,96286	64,3
LH1-6	7422	0,01347	0,00861	0,02474	0,1	2,83239	62,7

Jelikož není splněna ani jedna podmínka pro rovinnou deformaci, nelze určit kritickou hodnotu faktoru intenzity K_{Ic} z provizorní hodnoty K_Q . Pro vyhodnocení zkoušky je nutné použít elastoplastickou lomovou mechaniku, a to metodu kritického rozevření trhliny nebo křivkového J-integrálu.

Kritické rozevření trhliny

Výpočet jmenovitého napětí S_n :

$$S_n = \frac{1,5 \cdot F_c \cdot L}{B \cdot (W - a)^2} = \frac{1,5 \cdot 10019 \cdot 0,1}{1000000 \cdot 0,00892 \cdot (0,02484 - 0,01262)^2} = 1\,128,25 \text{ MPa} \quad (6.6)$$

kde

F_c je specifická síla odečtená ze záznamu [N]

L je rozteč podpor [mm]

B je tloušťka zkušebního tělíska [mm]

W je šířka zkušebního tělíska [mm]

a je celková délka trhliny [mm]

Výpočet rotačního součinitele v plastické oblasti r_p :

$$r_p = 0,4 \cdot (1 + \alpha) \cdot \left(\frac{a}{W}\right) \cdot \left(\frac{S_n}{R_e}\right) = 0,4 \cdot (1 + 0,1) \cdot \left(\frac{0,01262}{0,02484}\right) \cdot \left(\frac{1\,128,25}{427}\right) = 0,591 \quad (6.7)$$

kde

S_n je jmenovité napětí [MPa]

R_e je mez kluzu v tahu, za R_e lze použít $R_{p0,2}$, R_{eH} , $R_{t0,5}$ [MPa]

r_p je rotační součinitel v plastické oblasti [-]

α je součinitel mezi tahovou a ohybovou složkou namáhání, pro zkušební těleso na tříbodový ohyb se volí $\alpha = 0,1$

W je šířka zkušebního tělíska [mm]

a je celková délka trhliny [mm]

$$\begin{aligned} \delta_C &= \delta_{el.} + \delta_p = \frac{(1 - \mu) \cdot K_{IC}^2}{2 \cdot R_e \cdot E} + V_{CP} \left(1 + \frac{1}{r_p} \cdot \frac{a + z}{W - a}\right) = \\ &= \frac{75,7^2}{2 \cdot 427 \cdot 230\,769,2} + \frac{0,591 \cdot (24,84 - 12,62) \cdot 0,27}{0,591 \cdot (24,84 - 12,62) + 12,62} = 0,114 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6.8)$$

kde

r_p je rotační součinitel v plastické oblasti [-]

μ je Poissonova konstanta, pro uhlíkové ocele je $\mu = 0,3$ [-]

K_{IC} je lomová houževnatost při rovinné deformaci [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$]

E je modul pružnosti v tahu pro ocele je $E = 2,1 \cdot 10^5$ [MPa]

W je šířka zkušebního tělíska [mm]

a je celková délka trhliny [mm]

z je vzdálenost místa měření rozevření vrubu od povrchu [mm]

V_{cp} je plastická část rozevření trhliny, v tomto případě $V_{cp} = 0,27$ mm [mm]

Podmínky platnosti metody kritického rozevření trhliny:

$$a \leq 50 \cdot \delta_C = 50 \cdot 0,114 = 5,7 \text{ mm} \quad (6.9)$$

24,25 mm \leq 5,7 mm \Rightarrow podmínka není splněna

$$(W - a) \leq 50 \cdot \delta_C = 50 \cdot 0,114 = 5,7 \text{ mm} \quad (6.10)$$

$$(W - a) = 24,84 - 12,62 = 12,22 \text{ mm}$$

12,22 mm ≤ 5,7 mm ⇒ podmínka není splněna

Tab. 6.7 Rozměry zkušebních tělísek a hodnoty lomové houževnatosti stanovené pomocí metody kritického otevření trhliny

Označení vzorku	Síla F_Q	Provizorní hodnoty lomové houževnatosti K_Q	Kritické otevření trhliny δ_{IC}
	[N]	[MPa.m ^{0,5}]	[mm]
LH1-1	10019	75,7	0,114
LH1-2	6838	66,1	0,167
LH1-3	8159	60,8	0,3
LH1-4	5532	42,6	0,005
LH1-5	7323	64,3	0,013
LH1-6	7422	62,7	0,012

Ani u jednoho vzorku nebyly splněny podmínky pro stanovení lomové houževnatosti pomocí metody kritického otevření trhliny, a proto je nutné využít metody křivkového J-integrálu.

Křivkový J-integrál

Výpočet kritické hodnoty J_C :

$$J_C = J_{CE} + J_{CP} = \frac{1 - \mu^2}{E} \cdot K_C^2 + \frac{X_i \cdot A_{CP}}{B \cdot (W - a)} = \quad (6.11)$$

$$= \frac{1 - 0,3^2}{2,1 \cdot 10^5} \cdot 75,7^2 + \frac{2 \cdot 10,26}{8,92 \cdot (24,84 - 12,62)} = 0,214 \text{ MPa.m}$$

kde

μ je Poissonova konstanta, pro uhlíkové ocele je $\mu = 0,3$ [-]

X_i je součinitel pro zatížení zkušebního tělesa tříbodovým ohybem $X_i = 2$ [-]

A_{CP} je plocha plastické části v diagramu F-f [MPa.m]

E je modul pružnosti v tahu pro ocele je $E = 2,1 \cdot 10^5$ [MPa]

W je šířka zkušebního tělíska [mm]

a je celková délka trhliny [mm]

B je tloušťka zkušebního tělíska [mm]

Podmínky platnosti křivkového J-integrálu:

$$a \geq 50 \cdot \frac{J_C}{R_e \cdot R_m} = 50 \cdot \frac{0,214}{427 + 591} = 0,0105 \text{ m} = 1,05 \text{ mm} \quad (6.12)$$

$12,62 \text{ mm} \geq 1,05 \text{ mm} \Rightarrow$ podmínka je splněna

$$B \geq 50 \cdot \frac{J_C}{R_e \cdot R_m} = 50 \cdot \frac{0,214}{427 + 591} = 0,0105 \text{ m} = 1,05 \text{ mm} \quad (6.13)$$

$24,6 \text{ mm} \geq 1,05 \text{ mm} \Rightarrow$ podmínka je splněna

$$(W - a) \geq 50 \cdot \frac{J_C}{R_e \cdot R_m} = 50 \cdot \frac{0,214}{427 + 591} = 0,0105 \text{ m} = 1,05 \text{ mm} \quad (6.14)$$

$$(W - a) = 24,84 - 12,62 = 12,22 \text{ mm}$$

$12,22 \text{ mm} \geq 1,05 \text{ mm} \Rightarrow$ podmínka je splněna

Výpočet lomové houževnatosti pomocí J-integrálu:

$$K_{CJ} = \sqrt{\frac{J_{Ic} \cdot E}{1 - \mu^2}} = \sqrt{\frac{0,214 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{1 - 0,3^2}} = 219,9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5} \quad (6.15)$$

kde

μ je Poissonova konstanta, pro uhlíkové ocele je $\mu = 0,3$ [-]

E je modul pružnosti v tahu pro ocele je $E = 2,1 \cdot 10^5$ [MPa]

J_{Ic} je kritická hodnota lomové houževnatosti stanovená pomocí J-integrálu [MPa.m^{0,5}]

Tab. 6.8 Hodnoty kritické hodnoty J_{Ic} a výsledky lomové houževnatosti K_{CJ}

Označení vzorku	Síla F_c [N]	Kritická hodnota J_{Ic} [MPa.m ^{0,5}]	Lomová houževnatost K_{CJ} [MPa.m ^{0,5}]
LH1-1	10019	0,214	219,9
LH1-2	6838	0,294	257,9
LH1-3	8159	0,158	189,4
LH1-4	5532	0,050	106,1
LH1-5	7323	0,097	148,2
LH1-6	7422	0,080	134,7

Stanovení lomové houževnatosti bylo uskutečněno na šesti vzorcích odebraných v podélném a příčném směru. Ani jeden vzorek nesplňoval podmínky rovinné deformace, a proto bylo nutné při jejím stanovení využít elastoplastické lomové mechaniky. V prvním případě metodou kritického rozevření trhliny, u které taktéž ani jeden vzorek nesplnil požadavky, a proto bylo nutné využít křivkového J-integrálu. Hodnoty v obvodovém směru měly nižší hodnoty, což je způsobeno orientací struktury.

Ze stanovených hodnot lomové houževnatosti byla spočítána velikost kritického defektu vnější podélné povrchové poloeliptické trhliny, pomocí vztahu navrženým Neumamen [57], který při ověřování přesnosti dosahoval nejlepších hodnot [1]. Předpokladem je, že trhlina má symetrický tvar, který je daný vztahem $a=4.c$. Upravený vztah pro tenkostěnou válcovou nádobu je vyjádřen vztahem 6.16:

$$K_{CJ} = \left[M_F + (E_K \sqrt{c/a} - M_F) \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^p \right] \cdot \frac{\sigma_o}{E_K} \cdot M_{TM} \quad (6.16)$$

$$M_F = \sqrt{c/a} \left(1 + 0,03 \frac{c}{a} \right) \quad (6.17)$$

$$E_K = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{c^2 - a^2}{c^2} \sin^2 \theta} d\theta \quad (6.18)$$

$$p = 2 + 8 \left(\frac{a}{c} \right)^3 \quad (6.19)$$

$$M_{TM} = \frac{\left(1 - \frac{a}{t} \right)}{\left(1 - a/t \right)} \quad (6.20)$$

$$M_T = \sqrt{1 + 1,6 \cdot \lambda^2} \quad (6.21)$$

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{R \cdot t}} \quad (6.22)$$

kde

M_F je funkce závislá na geometrii trhliny [-]

E_K je eliptický integrál druhého druhu [-]

p je funkce závislá na geometrii trhliny [-]

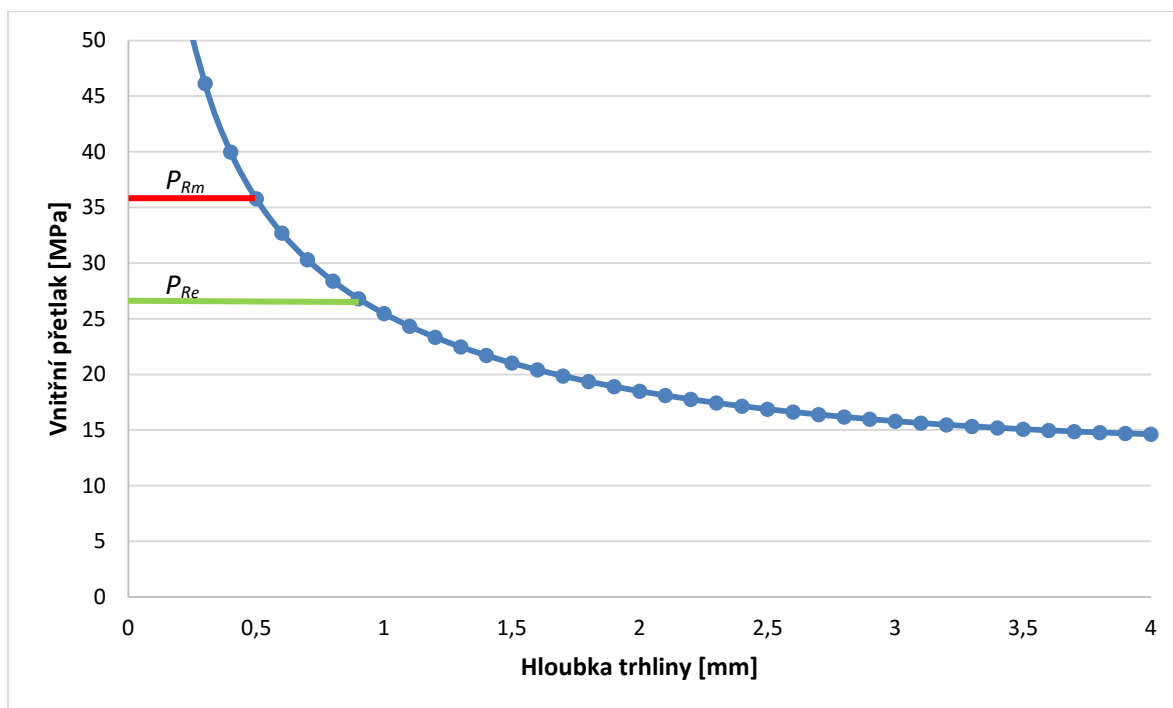
M_{TM} je korelační faktor pro válcové skořepiny [-]

M_T je Foliasův korelační faktor [-]

c je polodélka trhliny [mm]

R je střední poloměr trubky [mm]

t je tloušťka stěny trubky [mm]



Obr. 6.15 Závislost velikosti hloubky trhliny na vnitřním přetlaku

Graf na obr. 6.15 zobrazuje závislost hloubky trhliny na vnitřním přetlaku. Pokud se průsečík hodnoty hloubky trhliny a hodnoty vnitřního přetlaku nachází pod modrou křivkou nedojde k protržení ligamentu a k destrukci tělesa. V grafu je dále vyznačena hodnota vnitřního přetlaku pro mez kluzu (červená křivka) a mez pevnosti (zelená křivka), při mezi kluzu dochází k vytvoření plastických deformací ve stěně trubky.

7 Tlaková zkouška

Tlaková zkouška byla realizována vnitřním přetlakem a doporučeným tlakovým médiem byla voda. Jen ve velmi výjimečných případech je možné použít vzduch nebo jiný inertní plyn [58].

První etapa probíhala náběhem na cílový provozní tlak 7,35 MPa rychlostí okolo 3 barů/minutu, výdrž 20 minut na provozním tlaku (minimální stanovená hodnota 10 minut) a následovalo odlehčení. Celý průběh měření byl zaznamenáván pomocí měřící aparatury.

Ve druhé fázi bylo provedeno cyklování vnitřního přetlaku s maximální hodnotou 7,35 MPa a minimální hodnotou blízkou nulovému tlaku. Celkový počet cyklů s těmito parametry byl 1000. Proměření tenzometrickou soustavou bylo provedeno vždy po 200 cyklech. Cílem bylo ověřit, zda přítomné defekty rostou v důsledku provedeného cyklického zatěžování.

Poslední etapou tlakové zkoušky bylo kontinuální měření deformací na defektech při postupném zvyšování vnitřního přetlaku s výdržemi na hodnotách meze kluzu a při tlaku blízkému konečné destrukci.

7.1 Rozmístění tenzometrů

Tenzometry byly rozmístěny na šesti defektech (defekt č. 4, 6, 7, 14, 15, 17) detekovaných na rovné části tělesa a to pouze do směru obvodového (umístění tenzometru v obvodovém směru na vadě č. 7 viz obr. 7.1), z důvodu dvojnásobného napětí v obvodovém směru a na defektu č. 10 a 11 v podélném i obvodovém směru.

Další sada tenzometrů byla rozmístěna na místa s nejnižší dosahovanou tloušťkou stěny a to na souřadnicích C4, B6, A31 a H33 v podélném i obvodovém směru.

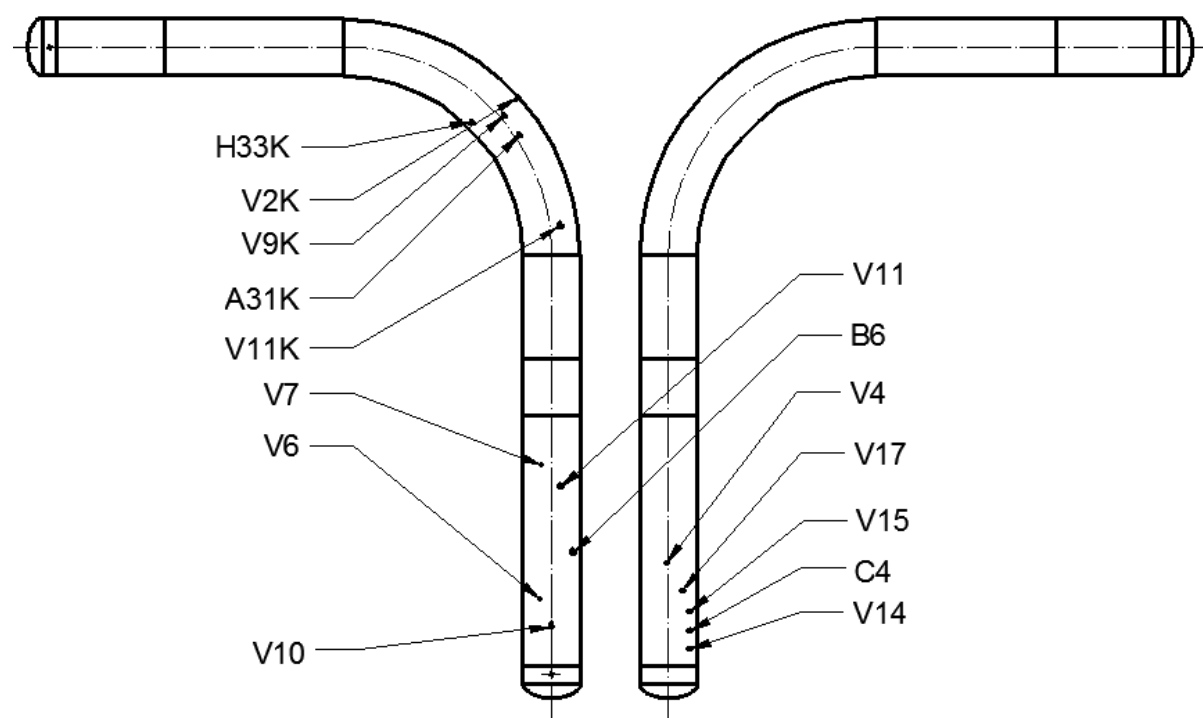
Poslední sada tenzometrů byla nalepena na třech defektech (vada č. 2K, 9K a 11K) v obloukové části potrubního tělesa a to v podélném i obvodovém směru.



Obr. 7.1 Ilustrativní obrázek umístění tenzometru na indikované vadě č. 7

Schéma na obr. 7.1 zobrazuje polohu všech tenzometrů, kde levá část obrázku zobrazuje pohled zhora a pravá část obrázku zobrazuje pohled na těleso zdola. Obrázek není v měřítku a zobrazování neodpovídá pravouhlému promítání z důvodu lepšího rozmístění schématu v textu.

Popisek u tenzometrů nese písmeno a číslici, písmeno V znamená, že se jedná o indikovanou vadu a číslice určuje, o kterou konkrétně se jedná. Pokud se za tímto popiskem nachází ještě písmeno K, jedná se o vadu indikovanou na kolenu. Jestliže název obsahuje jiné první písmeno než V, jedná se o tenzometry umístěné na místech s nejménší naměřenou hodnotou tloušťky stěny a značení odpovídá síti vytvořené při měření tloušťky stěny viz. kapitola 6.4.



Pozn.: Schéma neodpovídá pravoúhlému promítání, které se standardně používá při zobrazování na výkresech

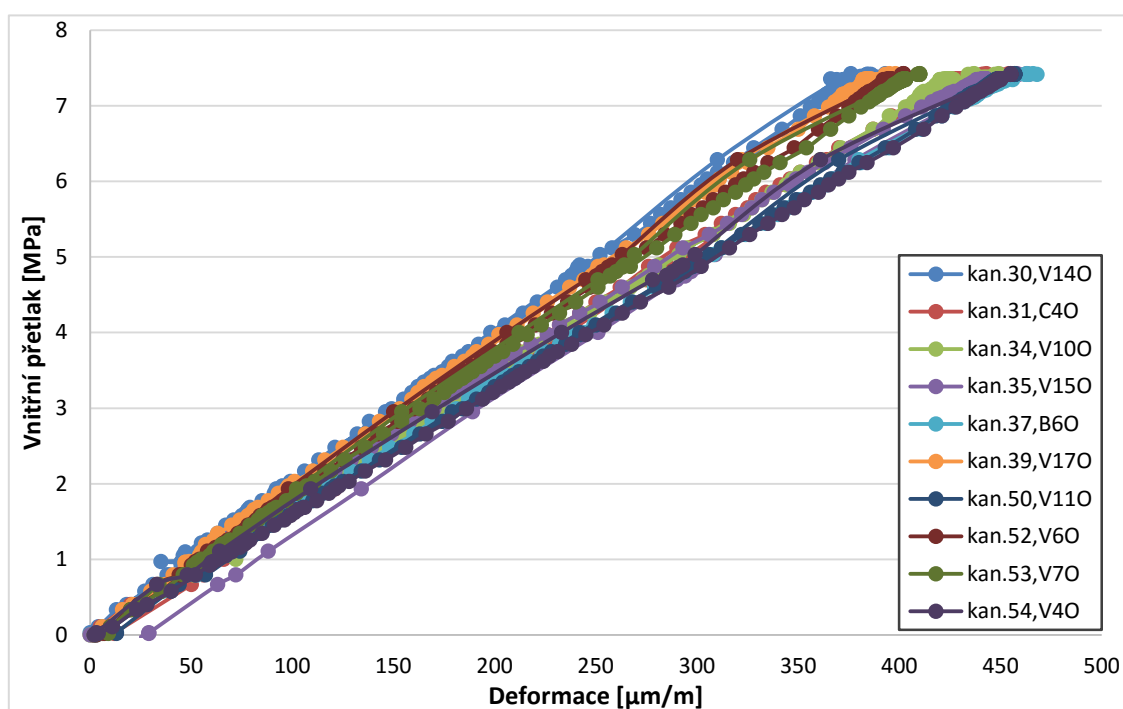
Obr. 7.2 Schéma rozmístění tenzometrů na tělese připravené k tlakové zkoušce

7.2 Měření deformací při náběhu tlaku na 7,35 MPa

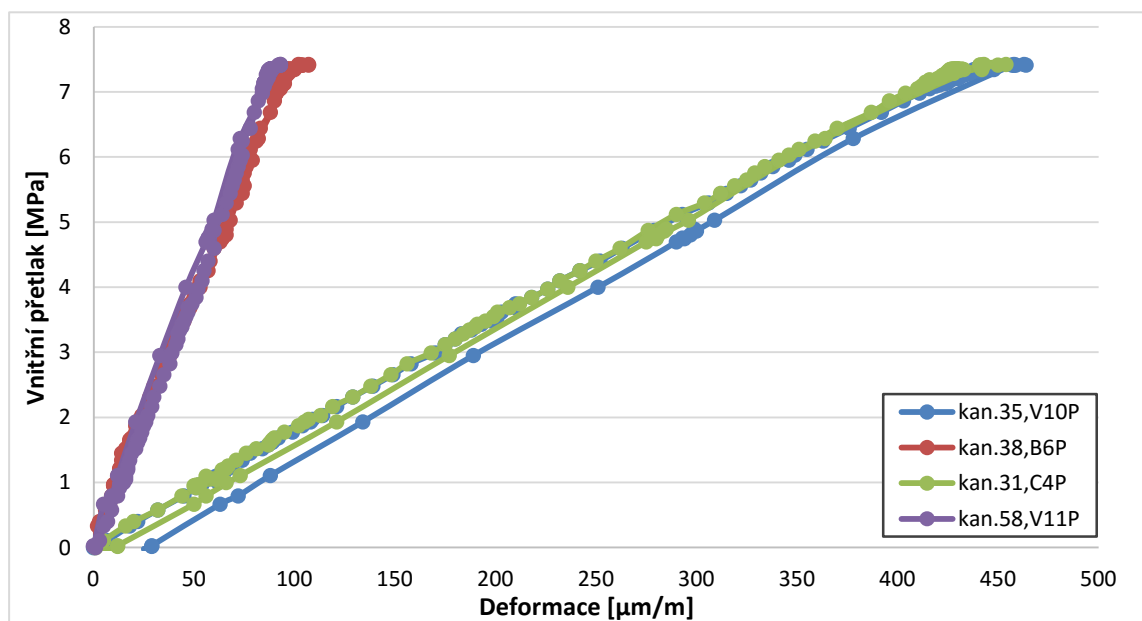
Zobrazení na diagramech – obr. 7.3 – 7.6 odpovídá obvyklé inženýrské praxi, to znamená, že na vodorovnou osu vynášíme deformaci a na svislou osu napětí (v našem případě vnitřní přetlak uvnitř trubky). Toto zobrazení se používá na příklad u statické tahové zkoušky. Toto je poznamenáno z toho důvodu, že v některých pracích je použito prohození os.

Na následujících diagramech obr. 7.3 – 7.6 jsou uvedeny závislosti deformací na vnitřním přetlaku prvním zatěžováním na pracovní tlak 7.35 MPa pro jednotlivé čtyři skupiny tenzometrů, konkrétně:

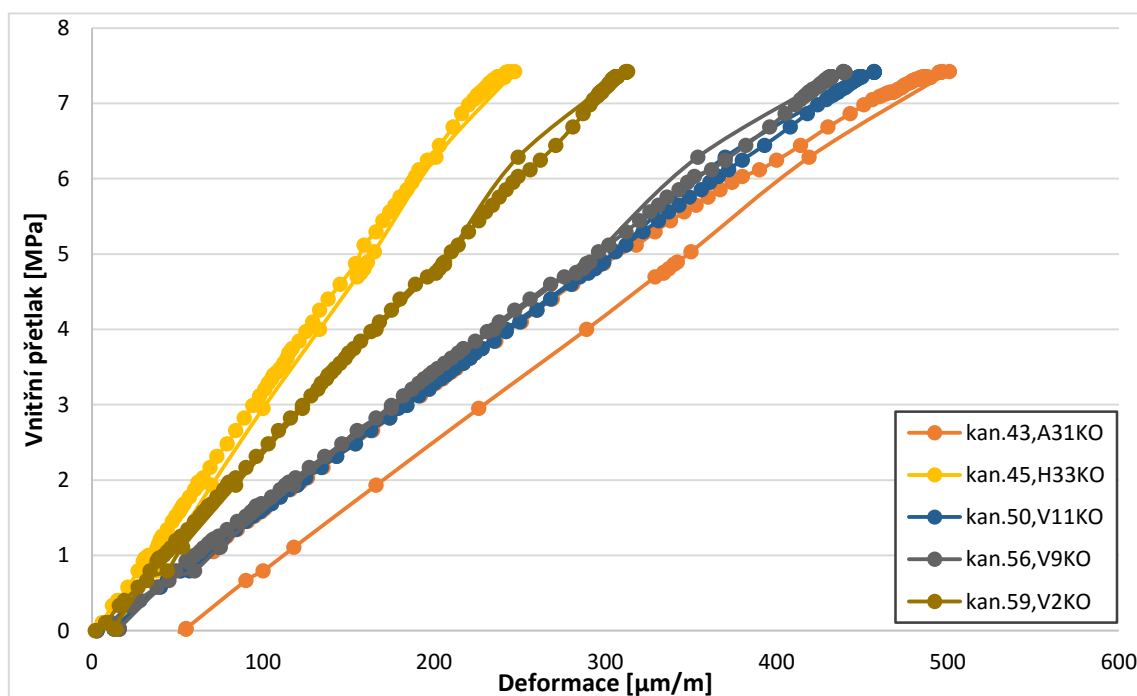
- Obr. 7.3 Závislost obvodových deformací na vnitřním přetlaku při prvním zatěžování na pracovní tlak 7.35 MPa na přímé části zkušební tělesa
- Obr. 7.4 Závislost podélných deformací na vnitřním přetlaku při prvním zatěžování na pracovní tlak 7.35 MPa na přímé části zkušební tělesa
- Obr. 7.5 Závislost obvodových deformací na vnitřním přetlaku při prvním zatěžování na pracovní tlak 7.35 MPa na zahnuté části tělesa
- Obr. 7.6 Závislost podélných deformací na vnitřním přetlaku při prvním zatěžování na pracovní tlak 7.35 MPa na zahnuté části tělesa



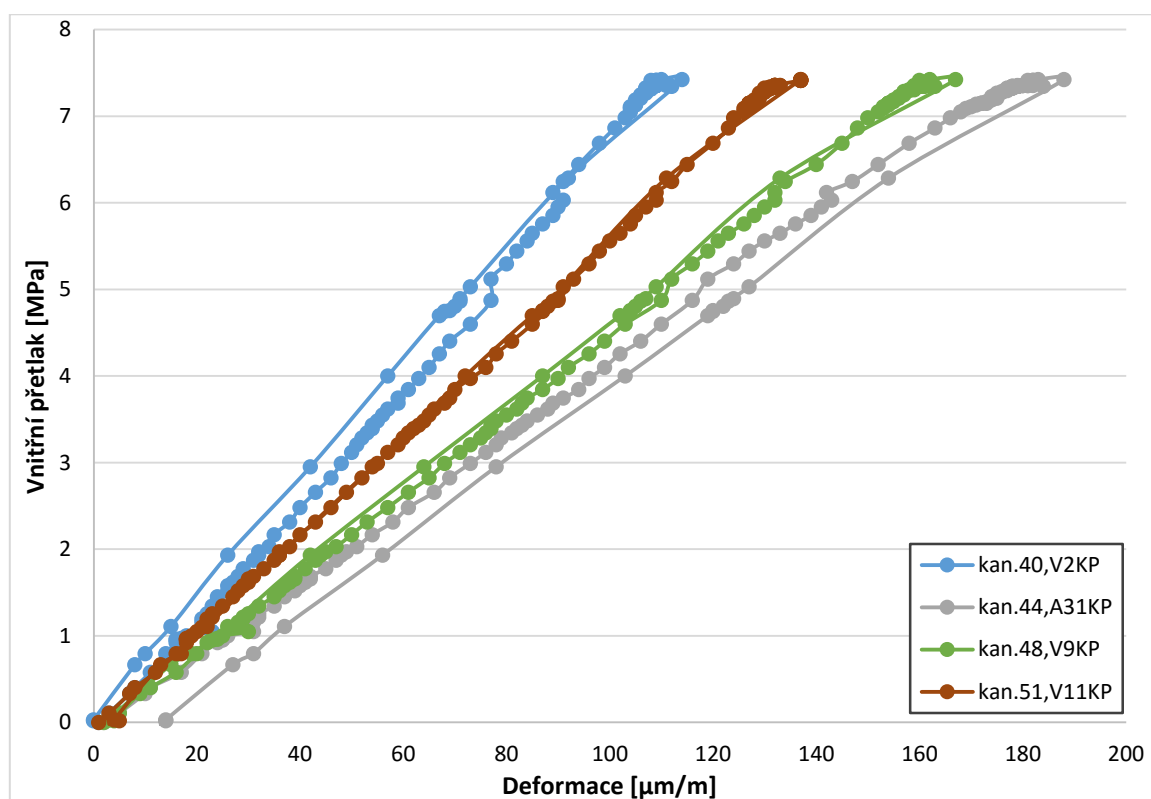
Obr. 7.3 Závislost obvodových deformací na vnitřním přetlaku při prvním zatěžování na pracovní tlak 7.35 MPa na přímé části zkušební tělesa



Obr. 7.4 Závislost podélných deformací na vnitřním přetlaku při prvním zatěžování na pracovní tlak 7.35 MPa na přímé části zkušební tělesa



Obr. 7.5 Závislost obvodových deformací na vnitřním přetlaku při prvním zatěžování na pracovní tlak 7.35 MPa na zahnuté části tělesa



Obr. 7.6 Závislost podélných deformací na vnitřním přetlaku při prvním zatěžování na pracovní tlak 7.35 MPa na zahnuté části tělesa

Na diagramech obr. 7.3 – 7.6 je skoro ve všech případech vidět lineární závislost, což je s ohledem na bezpečný provoz žádoucí. Malé odchylky sklonu stoupání mohou být způsobeny rozdílnou tloušťkou stěny v daných umístěních tenzometrů.

Hodnoty deformace některých obvodových tenzometrů, konkrétně zejména V150 (Obr. 7.3) a A31KO (Obr. 7.5), se po odlehčení nevrátily do nuly a zůstaly v kladných reziduálních hodnotách. U tenzometrů V150 je velmi málo pravděpodobné, že by došlo při tak nízkém tlaku k rozvoji plastických deformací. V případě, že ano, byl by plynovod s takovýmto defektem velmi ohrožen roztržením při pracovním tlaku, což by si vyžádalo rychlý zásah do provozu. V případě tenzometru A31KO, který byl umístěn v poloze 12 hodin na koleně, zcela jistě nejde o plastickou deformaci, neboť tloušťka stěny v kolenu byla cca o 5 mm větší než tloušťka stěny rovného úseku. Zatížení v tomto místě bylo hluboko pod mezí jakýchkoliv plastických deformací. Zřejmě se jedná o zbytkové deformace v důsledku určitého usazení tělesa v oblasti kolena, neboť zkušební těleso nebylo zcela volné, ale bylo umístěno v několika místech na dřevěných podporách.

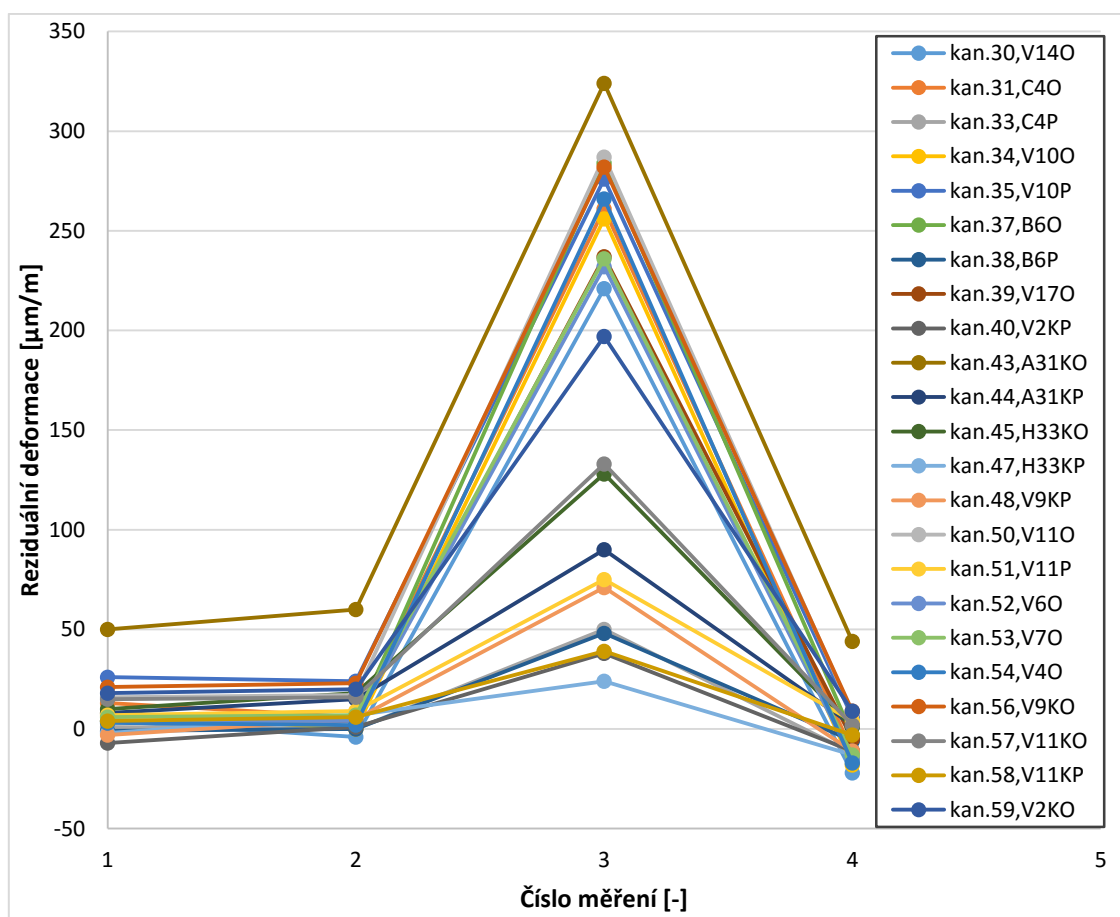
Kladné reziduální hodnoty deformace jsou pozorovány i na podélných tenzometrech konkrétně V10P (Obr. 7.4) a A31KP (Obr. 7.6). V případě tenzometru V10P je ještě méně pravděpodobnější, že by došlo k trvalým plastickým deformacím, jelikož napětí v podélném směru je

poloviční oproti obvodovému a navíc v případě tenzometru A31KP je tloušťka stěny zesílena o cca 5 mm, což výskyt plastických deformací ještě více neguje a jako v případě vady v podélném směru se spíše jedná o přerozdělení váhy tělesa na podporách.

V případě, že by se opravdu jednalo o plastické deformace způsobené otevřením trhliny ve stěně trubky poblíž zmíněných tenzometrů, tak by cyklickým tlakováním mělo dojít k jejich zvýšení vlivem růstu trhliny, což objasní kapitola 7.3 Měření deformací po cyklickém tlakování, a zároveň by došlo ke značnému poklesu limitních stavů a tudíž velmi nízkému tlaku destrukce.

7.3 Měření deformací po cyklickém tlakování

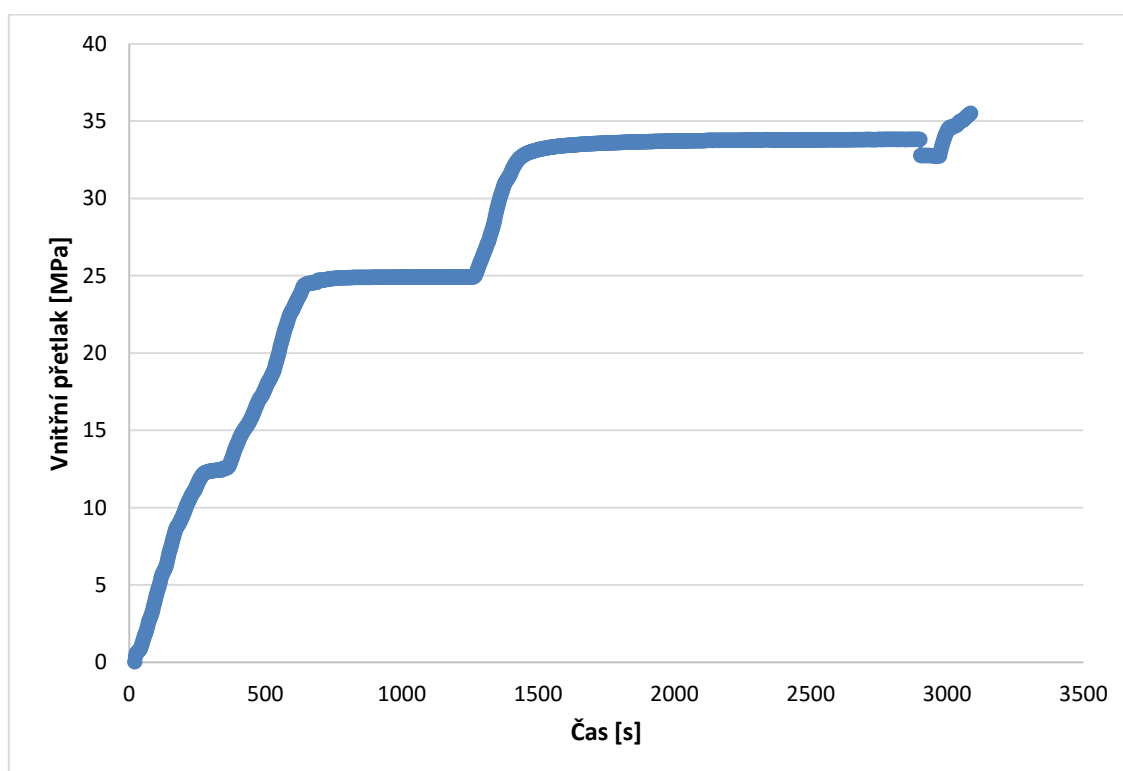
Charakter křivek napětí - deformace v různých etapách cyklického zatížení a na konci cyklického zatěžování byl podobný. Na následujícím diagramu (Obr. 7.7) jsou uvedeny reziduální deformace po jednotlivých etapách zatěžování. Tendence růstu deformací je pro všechny tenzometry shodná, včetně tenzometrů na koleně s větší tloušťkou stěny a tenzometrů podélných. Změny tedy jsou způsobeny spíše teplotními dilatacemi než reálnou plastickou deformací. Na základě toho lze konstatovat, že kladné reziduální hodnoty komentované v minulé kapitole jsou způsobeny přerозložením váhy tělesa na podporách nebo částečným odlepením tenzometru z povrchu tělesa.



Obr. 7.7 Reziduální deformace po jednotlivých etapách zatěžování, (1) – po prvním zatěžovacím cyklu, (2) po 200 cyklech, (3) po 800 cyklech, (4) po 1000 cyklech

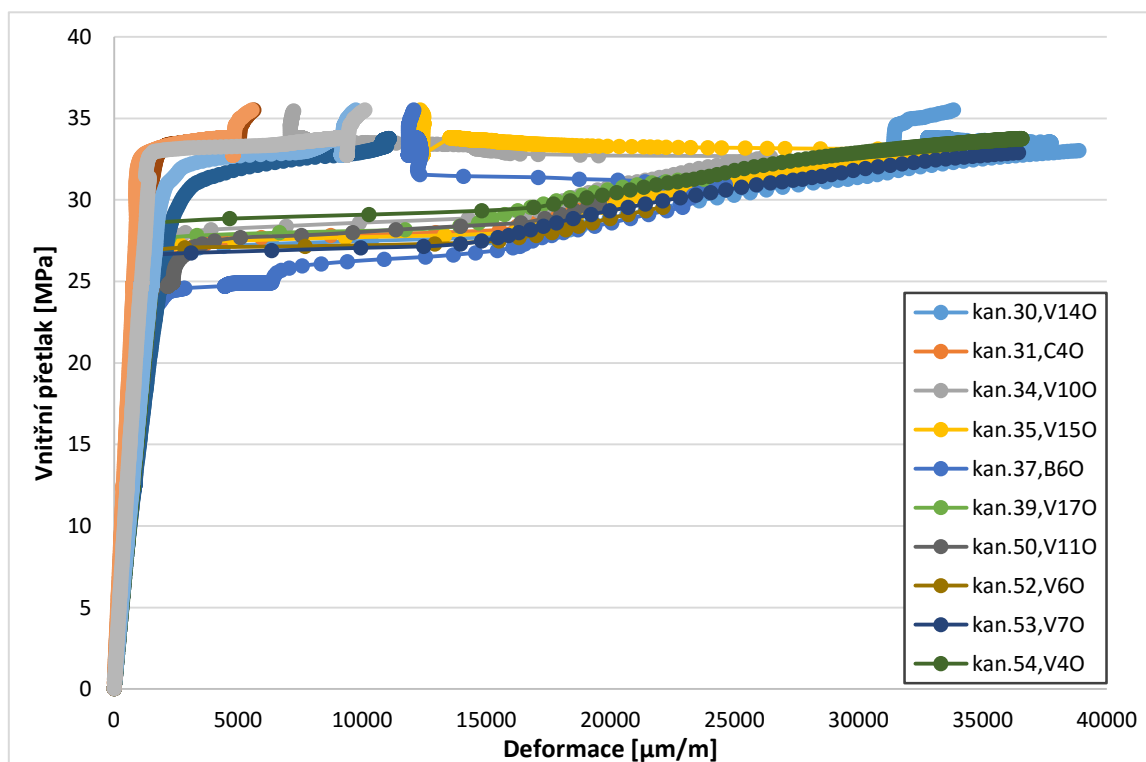
7.4 Tlakování do destrukce

Uvedené diagramy obr. 7.8 – 7.12 umožňují hodnotit limitní stavy poškození v jednotlivých místech trubek v podmínkách dvojosé napjatosti v porovnání se základními mechanickými vlastnostmi materiálu. Přestože k zatěžování segmentů potrubí na hranici mezních stavů v provozu běžně nedochází, poznatky tohoto typu si zaslouží další pozornost, neboť se jedná o důležité zjištění základního charakteru.

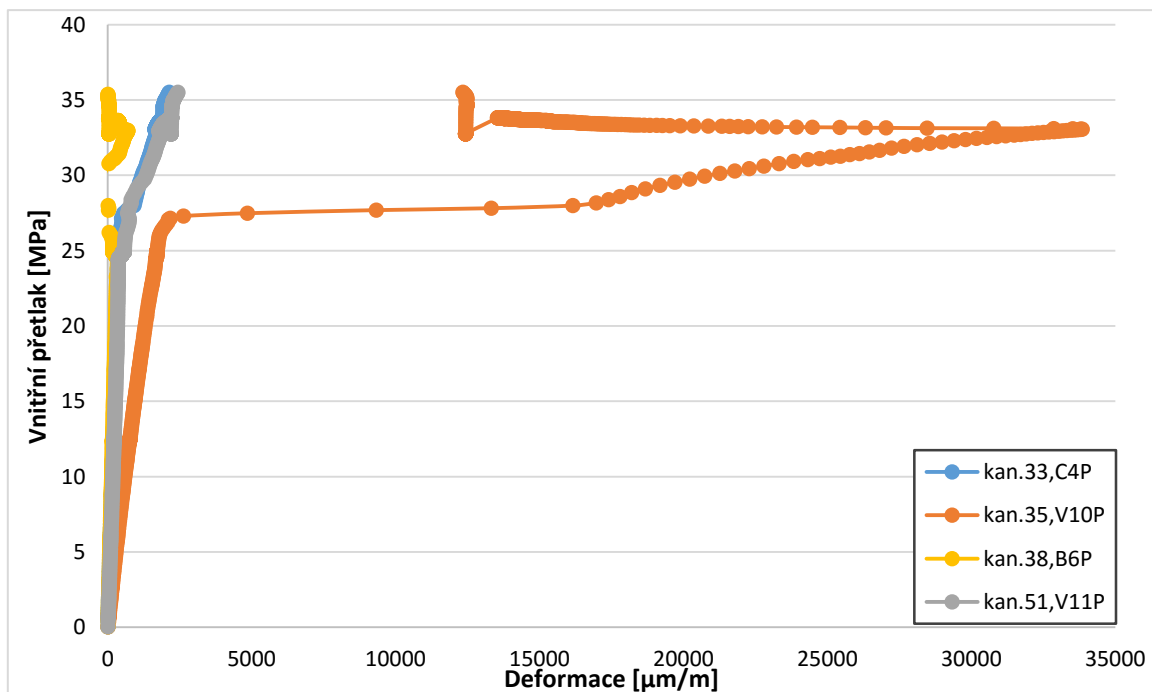


Obr. 7.8 Časový průběh zvyšování tlaku do destrukce

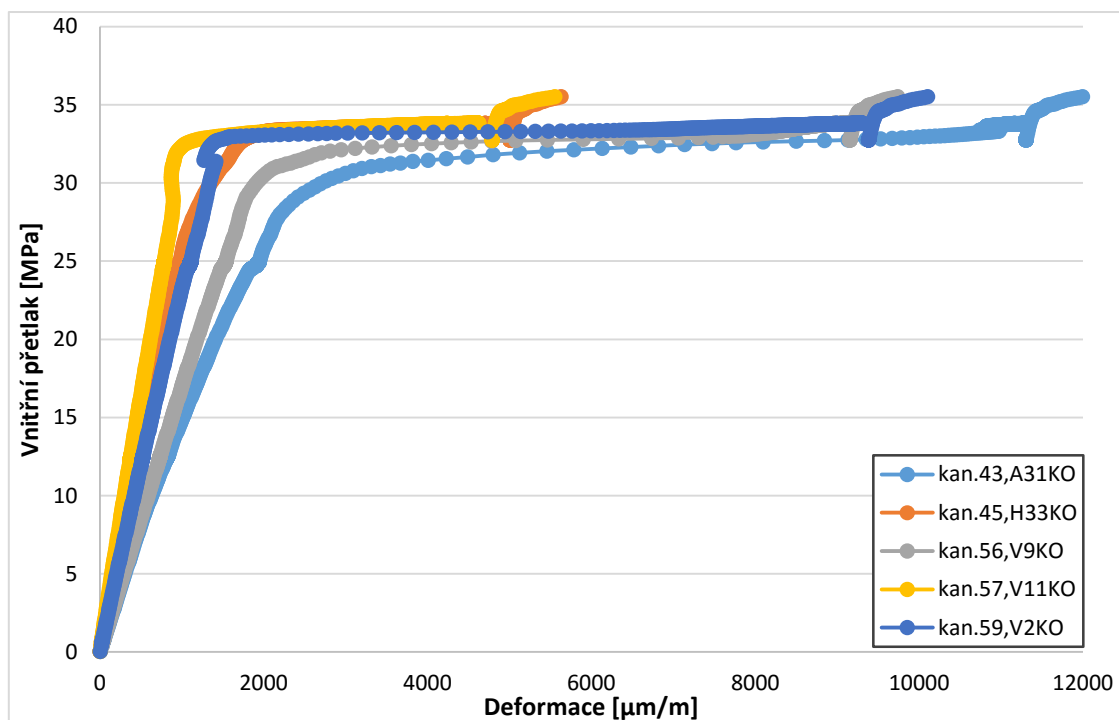
Diagram na obr. 7.8 zobrazuje závislost vnitřního přetlaku na čase při zkoušce do destrukce. Podle mechanických a lomových vlastností byla navržena prodleva na tlaku přibližně 25 MPa, kde mělo dojít k prvním skutečným plastickým deformacím, tudíž k dosažení meze kluzu v materiálu. Podle [58] má tato prodleva být minimálně 10 minut, aby došlo k přerozdělení napětí ve stěně trubky. Dlouhá prodleva na tlaku 34 MPa byla způsobena nucenou výměnou regulačního ventilu, jelikož nedovoloval vyšší tlakovou hodnotu a docházelo k jeho propouštění. Výměna byla uskutečněna při natlakovaném tělese, protože při dosažení 70 % limitního zatížení by nemělo dojít k přerušení zkoušky [59].



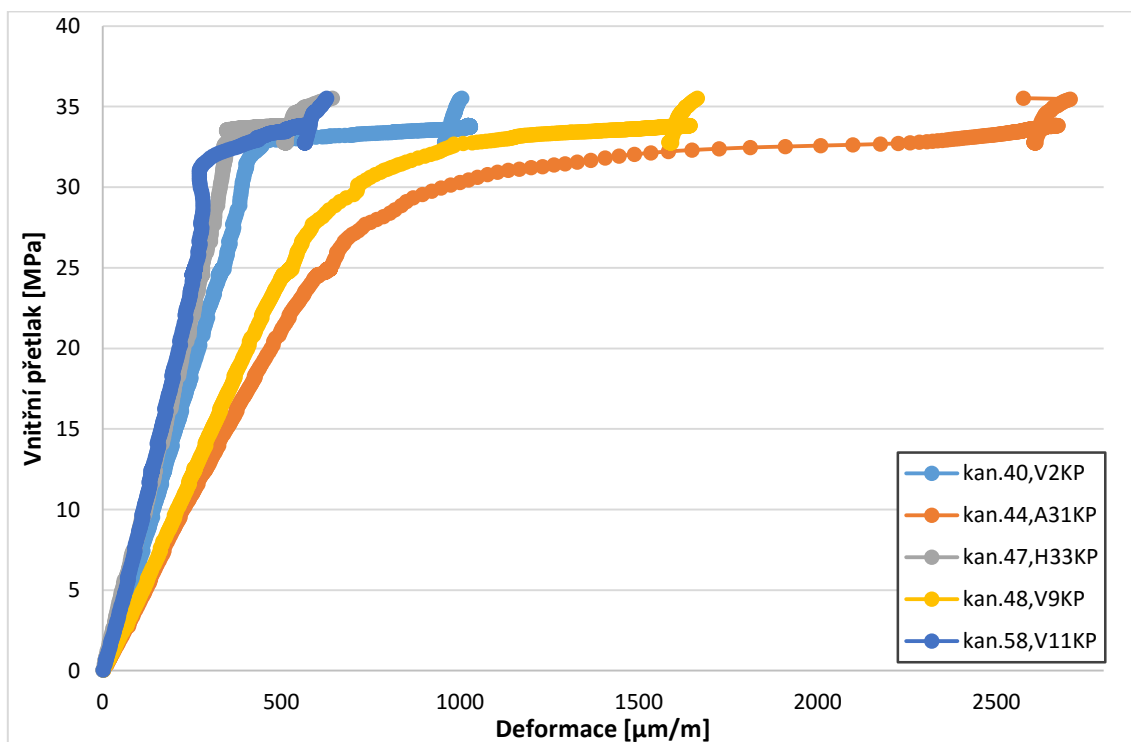
Obr. 7.9 Závislost obvodových deformací na vnitřním přetlaku při zkoušce do destrukce na přímé části zkušebního tělesa



Obr. 7.10 Závislost podélných deformací na vnitřním přetlaku při zkoušce do destrukce na přímé části zkušebního tělesa



Obr. 7.11 Závislost obvodových deformací na vnitřním přetlaku při zkoušce do destrukce na zahnuté části zkušebního tělesa



Obr. 7.12 Závislost podélných deformací na vnitřním přetlaku při zkoušce do destrukce na zahnuté části zkušebního tělesa

Na předložených diagramech obr. 7.9 – obr. 7.12 je vidět, že až do tlaku 26 MPa (což odpovídá napětí ve stěně při dvojosé napjatosti cca 340 MPa) na všech tenzometrech dochází k lineární závislosti vnitřního přetlaku na deformaci, tudíž napětí ve stěně trubky nedosahovalo meze kluzu. Také výsledky jsou velmi pozitivní pro provoz, jelikož do přibližně trojnásobku provozního tlaku nemůže dojít k ohrožení plynovodu. Nad touto hodnotou docházelo k prudkému nárůstu deformace a to hlavně na tenzometrech obvodových na rovné části tělesa se sníženou hodnotou tloušťky stěny. Následným zvyšováním tlaku došlo k překročení meze kluzu i na vadách v zahnuté části tělesa s vyšší nominální hodnotou tloušťky stěny a to zhruba okolo 29 MPa (což odpovídá napětí ve stěně při dvojosé napjatosti cca 290 MPa). Kontinuálním přírůstkem tlaku nastala destrukce tělesa na hodnotě 35,5 MPa (což odpovídá napětí ve stěně při dvojosé napjatosti cca 460 MPa).

Konstatovat lze, že defekty metalurgického typu (přeložky) s takovou četností zásadně nepovedou k bezprostřední havárii. Nicméně je nutné doporučit pravidelnou vnitřní inspekci v adekvátních intervalech.

8 Fraktografický rozbor oblasti lomu

K destrukci trubky došlo nedaleko svaru napojující zaslepovací dno, viz obr. 8.1. Iniaci lomu lze identifikovat zhruba na pozici C2 dle značení sítě pro měření tloušťky stěny (viz kapitola 6.4 Měření tloušťky stěny). Výsledky výše uvedených měření ukazují, že se jedná o oblast s jednou z nejmenších dosahovaných hodnot tloušťky stěny. Důležitým faktem je, že k iniciaci lomu nedošlo na žádné z identifikovaných trhlin. Nejbližší vada č. 14 je od oblasti iniciace lomu vzdálena přibližně 200 mm (Obr. 8.2).

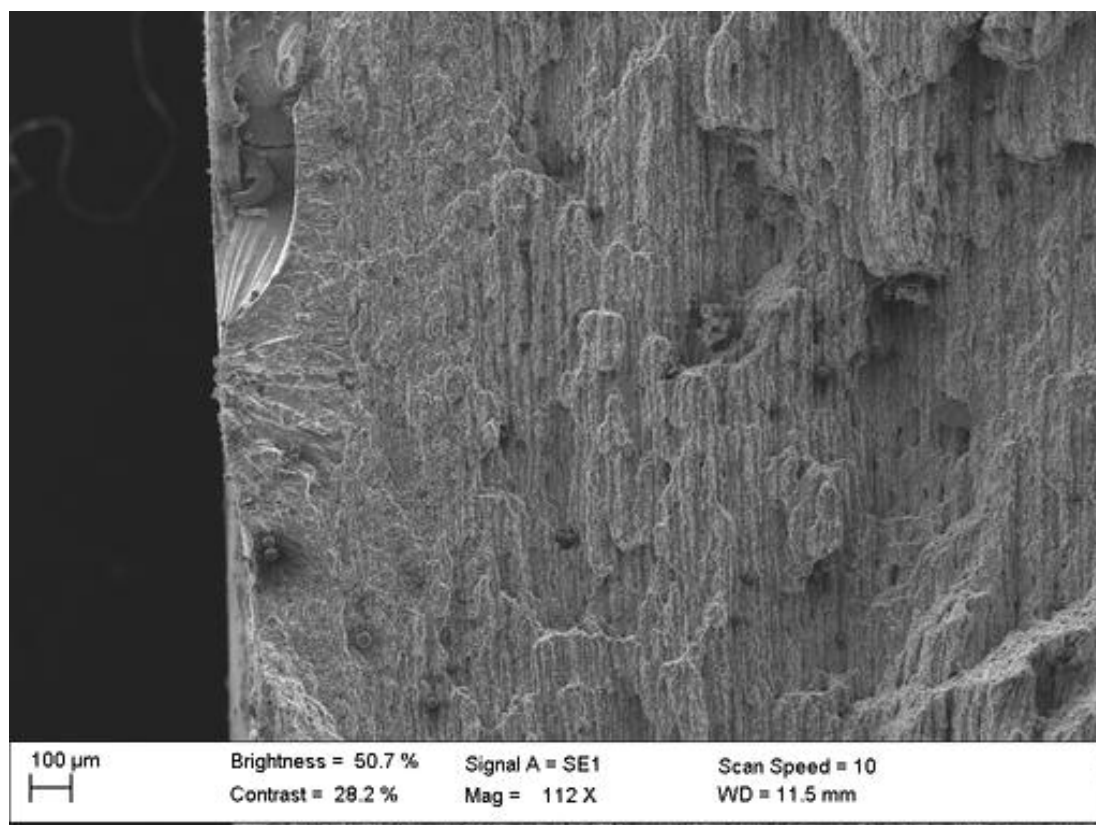


Obr. 8.1 Trubka DN300 po destrukci

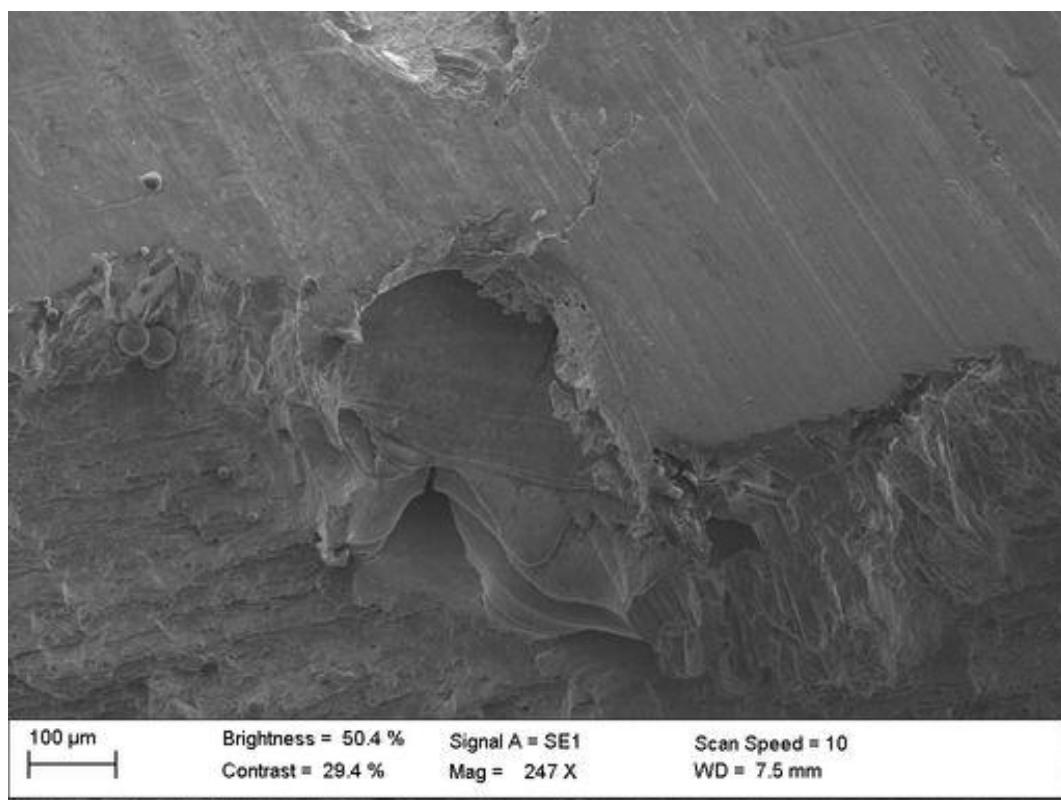


Obr. 8.2 Oblast iniciace trhliny a nejbližší trhlina č. 14

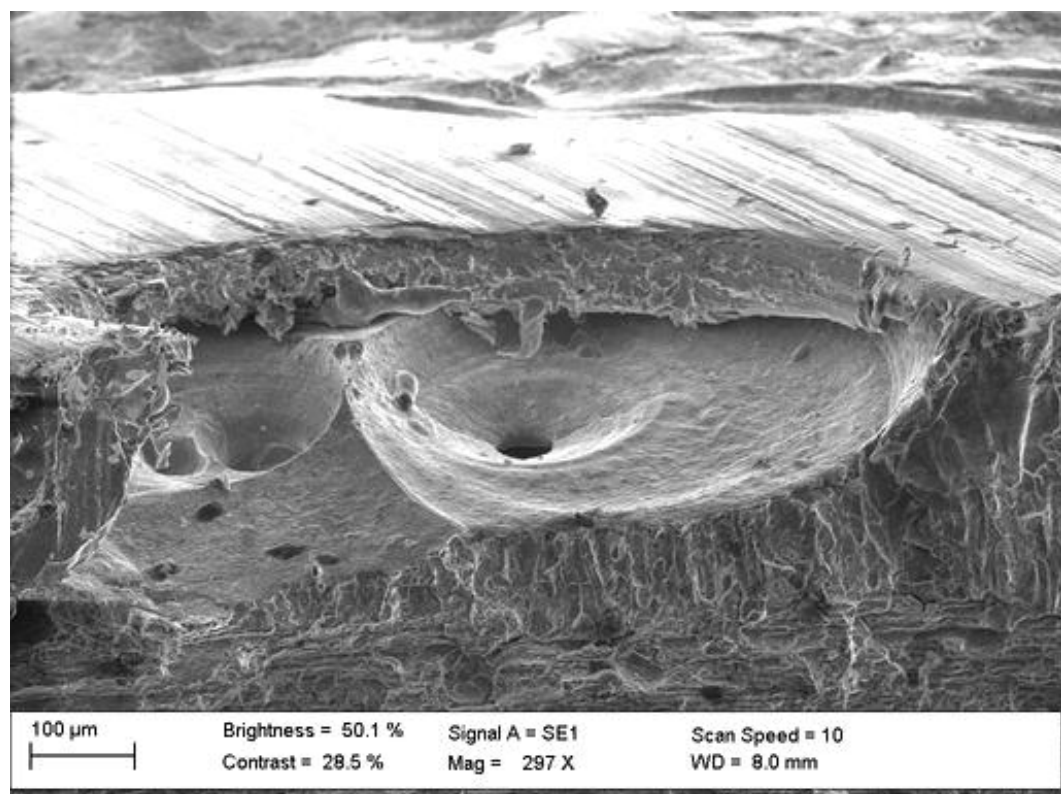
Oblast iniciace lomu byla vyříznuta a studována na elektronovém mikroskopu Zeiss EVO MA 10. Obr. 8.3 dokládá, že v místě iniciace lomu trubky došlo v průběhu zkoušek k nacyklování trhliny do hloubky cca 200 μm na vnějším povrchu trubky. Na obr. 8.4 je pak dále vidět, že k nacyklování únavové trhlinky došlo na důlku. Z vnitřního povrchu důlku (Obr. 8.5) lze usuzovat, že se jedná o důlek po extrahovaném vměstku. Z obr. 8.6 dále vyplývá, že k extrakci vměstku došlo vlivem broušení povrchu trubky (odstraňování barvy pro NDT). Zajímavým úkazem pak je, že délka únavové trhliny odpovídá délce vyvýšené broušené plošky na povrchu trubky (Obr. 8.6). Evidentně tak iniciace únavové trhlinky souvisí s broušením. Ze stop po broušení lze odvodit, že broušením bylo do materiálu vneseno tahové pnutí přibližně v obvodovém směru. Toto pnutí může významně usnadnit iniciaci dokumentované podélné únavové trhlinky. Vzhledem k tomu, že celá oblast má jednu z nejmenších naměřených tloušťek stěny, byla tato oblast pevnostně nejslabší. Při konečném destrukčním tlakování tak k lomu došlo právě v této oblasti.



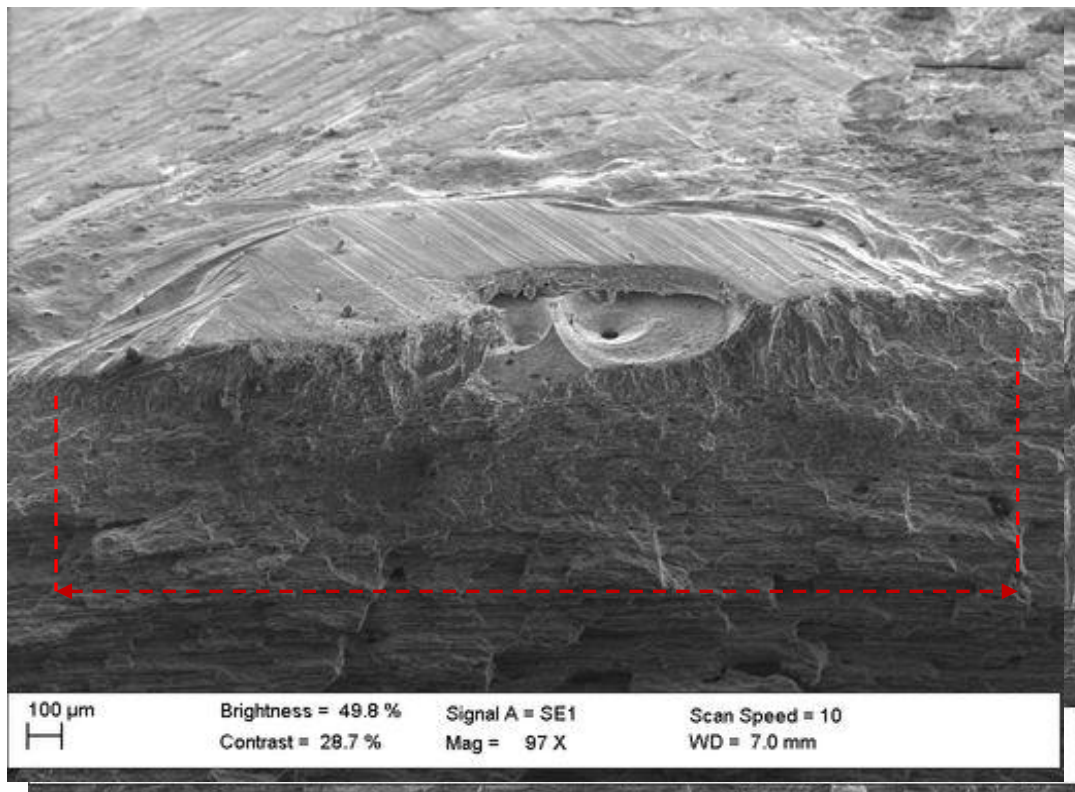
Obr. 8.3 Oblast iniciace lomu na vnějším povrchu trubky



Obr. 8.4 Část kruhového důlku v kterém iniciovala únavová trhlinka



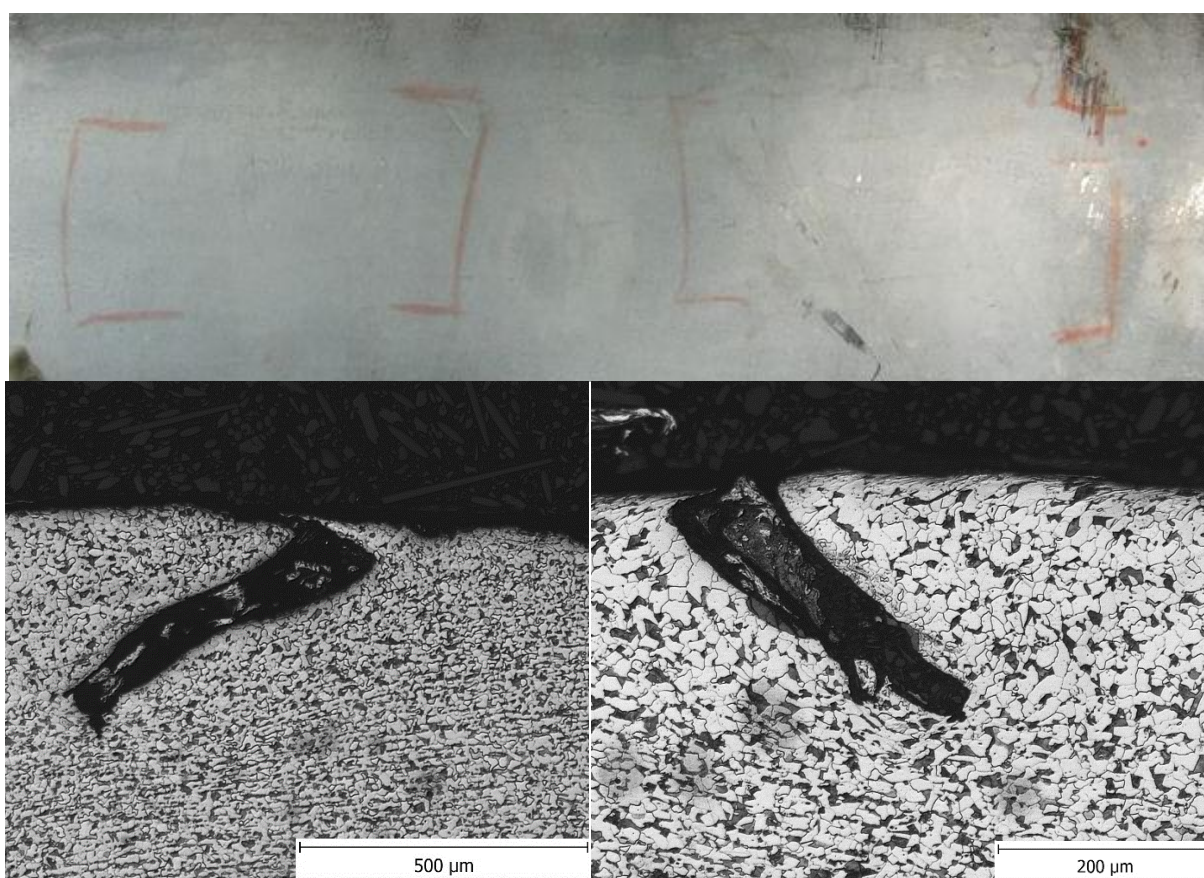
Obr. 8.5 Vnitřní povrch důlku s okolní únavovou trhlinou



Obr. 8.6 Obroušená vyvýšená oblast okolo důlku s velikostí korespondující s únavovou trhlinou

9 Metalografický rozbor trhlin na trubce po destrukci

Metalografický rozbor trhlin byl opět proveden na optickém mikroskopu Neophot 32. Jednotlivé řezy byly vedeny kolmo na směr trhlin a to u indikace č. 9 na koleni, na metalografickém výbrusu, ale žádná vada nebyla nalezena. Dále byly připraveny řezy z indikací č. 4 (dva řezy označené A a B), 10, 11, 14 a 15 z trubky č. 1. Následující obrázky dokládají fotografie výše uvedených indikací z NDT spolu s obrázky z metalografických výbrusů na řezech spolu s komentářem k nalezeným defektům.



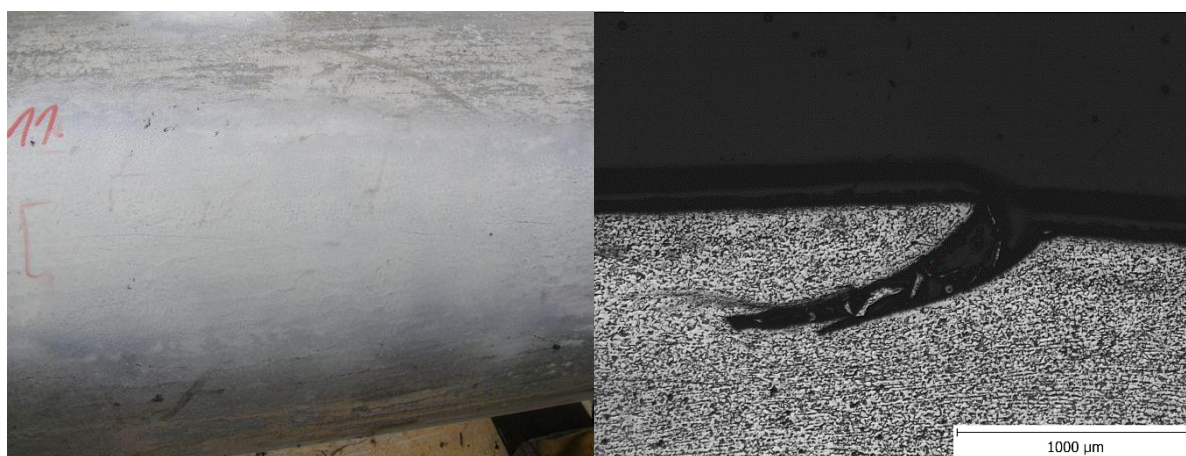
Obr. 9.1 Indikace č. 4

V oblasti indikace č. 4 bylo nalezeno sedm trhlin horní část obr. 9.1, které byly zkoumány ve dvou řezech a nejvyšší naměřená hloubka dosahovala v řezu A 409 µm zobrazena na levé dolní části obr. 9.1 (zvětšeno 51,2x, leptáno 4% Nitalem) a v řezu B dosahovala 323 µm zobrazena na pravé dolní části obr. 9.1 (zvětšeno 100x, leptáno 4% Nitalem). Uvnitř trhliny není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů, pouze zbytky korozních produktů z provozu.



Obr. 9.2 Indikace č. 10

V oblasti indikace č. 10 bylo nalezeno sedm trhlin levá část obr. 9.2, které zasahovaly do hloubek 52, 77, 83, 91, 93, 108, 141 a 166 μm (zvětšeno 100 x, leptáno 4% Nitalem), největší z těchto trhlin je na obr. 9.2 vpravo. V trhlíně není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů a oxidů.



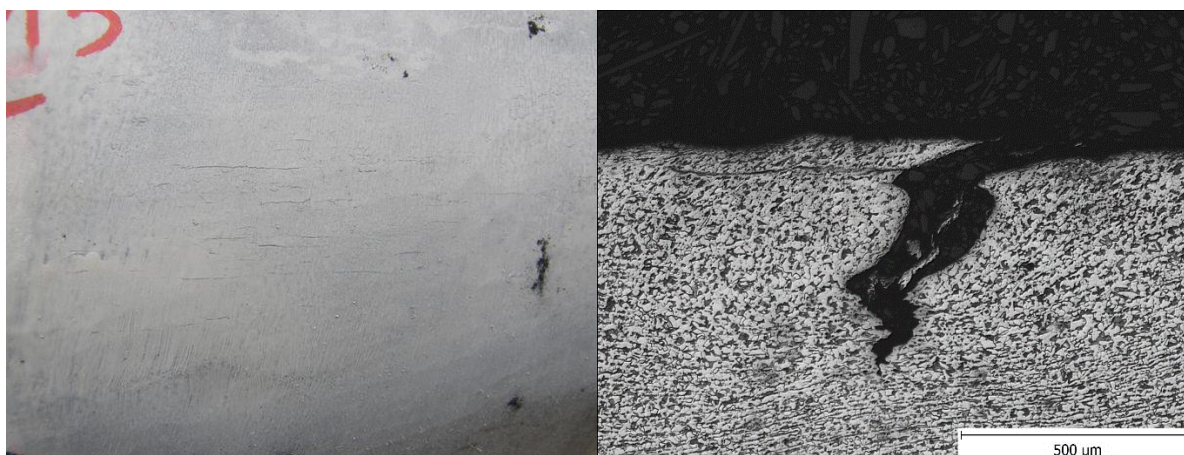
Obr. 9.3 Indikace č. 11

V oblasti indikace č. 11 byla nalezena jedna trhlina levá část obr. 9.3, které zasahovala do hloubky 558 μm (zvětšeno 25,6x, leptáno 4% Nitalem), zobrazena na pravé části obr. 9.3. Uvnitř trhliny není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů, pouze zbytky korozních produktů z provozu.



Obr. 9.4 Indikace č. 14

V oblasti indikace č. 14 byla nalezena jedna trhлина levá část obr. 9.4, které zasahovala do hloubky 570 μm (zvětšeno 51,2x, leptáno 4% Nitalem), zobrazena na pravé části obr. 9.4. Uvnitř trhliny není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů, pouze zbytky korozních produktů z provozu.



Obr. 9.5 Indikace č. 15

V oblasti indikace č. 15 bylo nalezeno celkem pět trhlin levá část obr. 9.5, které zasahovaly do hloubek 67, 100, 132, 205 a 508 μm (zvětšeno 51,2x, leptáno 4% Nitalem), největší z těchto trhlin je na obr. 9.5 vpravo. Uvnitř trhliny není pozorováno oduhličení ani přítomnost sulfidů, pouze zbytky korozních produktů z provozu.

Metalografický rozbor trhlin po destrukci potvrdil rozevření defektů po tlakové zkoušce, ne však na tolik zásadní, aby došlo na některé z indikovaných vad k roztržení tělesa. Soubor dat obsažených v této práci je jen potvrzením konstatování na závěru kapitoly 7.4 Tlakování do destrukce, že defekty toho typu zásadně neohrožují bezpečnost soustavy.

10 Závěr a hodnocení výsledků

Zpracovaná diplomová práce se zaměřuje na studium zbytkové životnosti vysokotlakých plynovodů po uběhnutí určité doby v provozu s cílem zajistit bezpečný transport plynného média z těžebních míst až k samotným odběratelům. Bezpečnost vysokotlakých potrubí je dána celým souborem faktorů, které se různou vahou podílejí na zbytkové životnosti, a které je možné rozdělit do tří kapitol podrobně popsanych v teoretické části práce.

Základním faktorem ovlivňující životnost potrubí je zvolená ocel, její chemické složení a čistota, jenž ovlivňuje mechanické vlastnosti a hlavně mez kluzu, které je jednou z nejdůležitějších vypovídajících hodnot o chování potrubí. Kritickou mechanickou hodnotou pro všechny aplikace je mez pevnosti, která vedle meze kluzu dává rozsáhlejší pohled na porušení potrubí. Z hlediska porušování má také velký význam vrubová houževnatost sloužící k doplnění vlastností získaných tahovou zkouškou. Jedná se o schopnost testovaného materiálu odolávat křehkému porušení, což je zásadní pro plynovody vedoucí např. nad vodními toky.

Technologie výroby trub válcováním má vždy určitý dopad na integritu trubek, což znamená vytvoření necelistvostí na vnitřním nebo vnějším povrchu, které mohou vést k předčasnému lomu tělesa. Defekty tohoto typu se mohou objevovat i na plechách pro výrobu svařovaných trubek, ale jejich výskyt je značně nižší. Spíše se zde nacházejí defekty svarů typu přesazení, střechovitosti a převážně u montážních svarů dochází k náhlému převýšení svaru nad povrch tělesa, ostrému nasazení závěrečné housenky, neprovaření kořenu nebo ke vzniku pórů ve svarovém kovu.

Zásadním faktorem ovlivňujícím životnost potrubí je vnitřní pracovní přetlak, při kterém je plynovodní soustava provozována a vyvozuje napětí ve stěně trubky. Mimo hodnotu pracovního přetlaku je také rozhodující, zda dochází ke kolísání vnitřního přetlaku uvnitř trubky. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou tlaku může být až 10 % u regionálních větví a u magistrálních může být ještě větší. Tento rozkmit vnitřního přetlaku je základním předpokladem pro vznik únavového poškození ve stěně potrubí. Při cyklickém namáhání s vysokým středním napětím je velikost amplitudy kolem 5 % středního napětí kritická a může vést k lomu. Nutnou podmínkou je existence ostrého defektu, který může transformovat v trhlinu.

Praktická část této práce ověřuje integritu segmentů trubek DN 300, u nichž byl v provozu detekován výskyt defektů typu trhlín. Defekty byly detekovány provozovatelem s informací, že jde o defekty značné hloubky, povrchové délky a četnosti.

Defektoskopická kontrola vnějšího povrchu byla provedena magnetickou práškovou metodou na všech třech dodaných segmentech a potvrdila výskyt defektů na celkem 71 indikacích s nejdelší

dosahovanou délkou cca 270 mm. Pro tlakovou zkoušku byly vybrány dva segmenty s největším výskytem vad a zbylý segment byl použit pro ověření základních materiálových charakteristik, metalografické a chemické analýze.

Metalografický rozbor ukázal, že trubka má obvyklou feriticko - perlitickou strukturu se vzorem velikostí zrna 7,5 - 8 a s průměrnou mikročistotou s poměrně malým (stupeň 1 – 1,5) výskytem vměstků pro sulfidické i oxidické vměstky. Trhliny zřejmě vzniklé při výrobě, měly délku v některých případech přesahující 2 mm, směr byl však velmi šikmý, stáčející se k povrchu s dosahovanou hloubkou přibližně 0,5 mm.

Chemickou analýzou bylo stanoveno, že se jedná o ocel 13 126 [50], která je standardně používaná pro vysokotlaké plynovody. Ze zjištěného chemického složení byl stanoven uhlíkový ekvivalent $C_{ekv} = 0,44 \text{ hm. \%}$.

Zkouška tahem byla provedena za laboratorní teploty 20 °C na vzorcích vyříznutých ze stěny trubky a to po dvou vzorcích ze směru obvodového a podélného. Bylo zjištěno, že materiál potrubí vykazuje velmi dobré hodnoty meze kluzu a meze pevnosti, splňující požadavky předepsané normou.

Zkouška rázem v ohybu byla provedena při teplotě 0 °C na vzorcích vyříznutých ze stěny trubky a to po třech vzorcích ze směru obvodového a ze směru podélného. Bylo zjištěno, že materiál potrubí nevyhověl technickým dodacím podmínkám pro ocelové trubky třídy B.

Zkouška lomové houževnatosti byla provedena při teplotě 0°C na třech vzorcích pro tříbodový ohyb (3PB) odebraných v podélném a příčném směru, ani jeden vzorek nesplňoval podmínky rovinné deformace, a proto bylo nutné při jejím stanovení využít křivkového J-integrálu. Z hodnot lomové houževnatosti byla vynesena závislost velikosti defektu v závislosti na vnitřním přetlaku.

Zbylé dva segmenty opatřené zaslepovacími dny byly podrobeny tlakové zkoušce, realizované vnitřním přetlakem s tlakovým médiem vodou. Experimentální hodnocení deformačních účinků tlakování ověřilo, že v potrubí při pracovním tlaku 7,35 MPa nedochází k žádné plastické deformaci a hodnoty deformací jsou hluboko pod mezí kluzu, což je velmi důležité pro budoucí provoz. Dále bylo provedeno 1000 cyklů s náběhem z nulového tlaku na provozní. Cílem bylo zjistit, zda nebude docházet k otevírání nebo přírůstku rozměrů trhlin a bylo prověřeno, že cyklické zatěžování s takto vysokou asymetrií cyklu, která není v provozu příliš běžná, neohrozí integritu potrubí. Následovalo tlakování do destrukce tělesa, které má stanovit limitní stavy plynovodu a přinést poznatky o mechanismech destrukce. K destrukci došlo při tlaku 35,5 MPa (což odpovídá napětí ve stěně při dvojosé napjatosti cca 460 MPa) a to mimo indikované vady defektoskopickou analýzou, ale na místě s nejmenší dosahovanou hodnotou tloušťky stěny, kde iniciovala krátká trhlinka z důlku, který vznikl patrně důsledkem vypadlého vměstku.

Na základě objemného souboru dat lze konstatovat, že pokud se i v ostatních částech potrubí nacházejí trhliny podobného charakteru, nehrozí bezprostřední havárie. Nicméně je nutné doporučit pravidelnou vnitřní inspekci v adekvátních intervalech.

11 Seznam použité literatury

- [1] GAJDOŠ, Lubomír. *Bezpečnost a integrita vysokotlakých plynovodů*. Praha: Český plynárenský svaz, 2011. ISBN 978-80-904619-2-5.
- [2] *CEPS: Projekty* [online]. © 2013–2016 [cit. 2016-01-20].
- [3] PONEVSKÝ, Nikolaj. *Doprava a distribúcia plynov*. Košice: VŠT, 1986.
- [4] GAJDOŠ, Lubomír. *SPOLEHLIVOST PLYNOVODNÍCH POTRUBÍ*. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02143-2.
- [5] *NET4GAS: Mapy* [online]. 2012 [cit. 2016-01-28].
- [6] PAŘÍZEK, František. Komplexní pojetí problematiky spolehlivosti potrubních systémů ve fázi výzkumných prací a při aplikaci jejich výsledků. In: *PROVOZNÍ SPOLEHLIVOST VYSOKOTLAKÝCH PLYNOVODŮ PO DLOUHÉ DOBĚ PROVOZU A JEJICH REAHABILITACE: 3. mezinárodní technické koloktívum*. Praha, 1994, s. 7-10.
- [7] ČSN EN ISO 3138 (42 1907). *Naftový a plynárenský průmysl - Ocelové trubky pro potrubní přepravní systémy*. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [8] LINHART, Václav, Vladimír HORÁLEK, Romana PAVELKOVÁ a Petr STRAKA. Výrobní a výstavbové vady na ocelových plynovodech, jejich identifikace a vztah k TDP. In: *Spolehlivost vysokotlakých ocelových potrubí: 10. mezinárodní koloktívum*. Praha, 2001.
- [9] SÍS, J., J. KEC, L. REMAR a I. ČERNÝ. *Porovnávací tahové zkoušky z trub DN 300 a DN 700 se statistickým vyhodnocením vlivu stavu povrchu na naměřené hodnoty*. Technická zpráva SVÚM a.s.: 1530 100 - 4. Čelákovice, 2016.
- [10] BEČVAŘÍK, Pavel. *Pevnostní charakteristiky ocelí trub dálkových plynovodů*. Technická zpráva SVÚM a.s.: Z-86-5417. Praha, 1986.
- [11] GAJDOŠ, Lubomír, Martin ŠPERL a Petr CRHA. COMPARISON OF FRACTURE TOUGHNESS OF CURVED AND FLAT CT SPECIMENS FOR THE GAS PIPELINE INTEGRITY MANAGEMENT. *IGRC International Gas Union Research Conference Copenhagen. Kodaň : International Gas Union, WP3-44*. 2014, , 10.
- [12] ČSN ISO 148-1 (420381). *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda*. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

- [13] EVANS, J., G. KOTSIKOS a R. ROUBEY A METHOD FOR FRACTURE TOUGHNESS TESTING CYLINDER MATERIAL. *Engineering Fracture Mechanics*. 1995, **50**(2), 295-300.
- [14] FABÍK, R. *TVÁŘENÍ KOVŮ* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2016-01-07].
Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TVKB/Tvareni%20kovu.pdf>.
Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [15] RICHTER, Tomáš. *OHÝBÁNÍ TRUBEK* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85459.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. LADISLAV ŽÁK, Ph.D.
- [16] LINHART, V., D. MIKULOVÁ, R. PLESKAČ a M. KNEIFL . *Posouzení provozní bezpečnosti a spolehlivosti potrubí DN 300 s reálnou vadou typu delaminace*.
Technická zpráva SVÚM a.s.: 6300881. Praha, 1997.
- [17] HERMAN, Václav. *NET4GAS*. [přednáška]. Praha: ČVUT, 6. Dubna 2016. b.r..
- [18] *NET4GAS: Projekty* [online]. 2012 [cit. 2016-04-20].
- [19] *MODŘANY Power, a.s.: Ohyby* [online]. 2015 [cit. 2016-02-14].
- [20] MICKA, Michal. Vliv geometrických imperfekcí na spolehlivost potrubí. In: *PROVOZNÍ SPOLEHLIVOST VYSOKOTLAKÝCH PLYNOVODŮ PO DLOUHÉ DOBĚ PROVOZU A JEJICH REAHABILITACE: 3. mezinárodní technické kolokvium*. Praha, 1994, s. 16-20.
- [21] Metodika stanovení životnosti zinkových povlaků v atmosférickém prostředí. *Konstrukce* [online]. 2011 [cit. 2016-07-23]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/metodika-stanoveni-zivotnosti-zinkovych-povlaku-v-atmosferickem-prostredi/>
- [22] ASTANIN, V., N. BORODACHEV a N. KUZNETSOV. THREE-DIMENSIONAL PROBLEM OF THE LIMIT STATE OF A MAIN PIPELINE WITH CORROSION DAMAGE. *Strength of Materials*. 2011, **43**(5), 548-558. ISSN 1573-9325.
- [23] PAPA VINASAM, S., A. DOIRON a R. REVIE Model to Predict Internal Pitting Corrosion of Oil and Gas Pipelines. *Corrosion*. 2010, **66**(3), 40-56. ISSN 00109312.
- [24] LEE, YK, YP KIM, MW MOON, WH BANG, KH OH a WS KIM. The Prediction of Failure Pressure of Gas Pipeline with Multi Corroded Region. *Materials Science Forum*. 2005, **475-479**(3323-3326), 3323-3326.
- [25] LI, Xin, Yu BAI, Chenliang SU a Mingshu LI. Effect of interaction between corrosion defects on failure pressure of thin wall steel pipeline. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2016, **138**, 8-18. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.01.002>.

ISSN 03080161.

Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030801611600003X>

- [26] LINHART, Václav, Ivo ČERNÝ a Vladimír HORÁLEK. Destrukce plynovodního potrubí po dlouhé době provozu na Karlovarsku: Destruction of a Gas Pipe after a Long Time of Operation in the Karlovy Vary Area. *Plyn*. 2011, **91**(6), 129-131. ISSN 00321761.
- [27] BEAVERS, J. a N. THOMSON *Environments and Industries: External Corrosion of Oil and Natural Gas Pipelines*. b.r..
- [28] GAJDOŠ, Ľubomír a Martin ŠPERL. Vliv koroze pod napětím na bezpečnost provozu plynovodu: Influence of SCC on Gas Pipeline Safety. *Plyn*. 2009, **89**(9), 195-199. ISSN 00321761.
- [29] KLESNIL, M. a P. LUKÁŠ *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*. Praha. Academia, 1975.
- [30] JANOVEC, J., K. MACEK a P. ZUNA *Fyzikální metalurgie*. Praha: ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02935-2.
- [31] KUNZ, Jiří. *Aplikovaná lomová mechanika*. Praha: ČVUT, 1991. ISBN 80-01-03306-6.
- [32] LINHART, Václav, Romana PAVELKOVÁ, Petr BROŽ a Martin ČIPERA. Vliv tlakového přetížení na retardaci růstu trhlin ve vysokotlakém potrubí: Effect of Overloading on the Retardation of the Growth of Cracks in High-pressure Pipelines. *Plyn*. 2013, **93**(4), 76-84. ISSN 00321761.
- [33] BEDEN, S. Fatigue crack growth rate of API X70 steel pipelines under spectrum loading. *The International journal of pressure vessels and piping* [online]. 2012, **96-97**, 7-12 [cit. 2016-05-31]. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2012.03.001. ISSN 03080161.
- [34] GAJDOŠ, Ľubomír a Martin ŠPERL. Změny integrity tlakových těles při opakovaném přetížení: Changes in the Integrity of Pressurised Vessels under Repeated Overload. *Plyn*. 2010, **90**(9), 195-199. ISSN 00321761.
- [35] GAJDOŠ, Ľubomír a Martin ŠPERL. Viskoplastické chování materiálu před čelem trhliny v potrubním tělese: Viscoplastic Behaviour of Materials ahead of the Crack Tip in a Pipe. *Plyn*. 2010, **90**(10), 223-227. ISSN 00321761.
- [36] KIEFNER, John a Willard MAXEY The benefits and limitations of hydrostatic testing. *API's 51st Annual Pipeline Conference & Cybernetics Symposium* [online]. New Orleans, Louisiana, 2000 [cit. 2016-06-01].

- Dostupné z: <http://kiefner.com/wp-content/uploads/2013/05/apihydro.pdf>
- [37] KUČERA, Josef. *Úvod do mechaniky lomu: nestabilní lom ocelových těles při statickém a dynamickém zatížení*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006. ISBN 8024812681.
- [38] *Ceps: Rehabilitace vysokotlakých ocelových potrubí po dlouhé době provozu* [online]. b.r. [cit. 2016-05-31].
Dostupné z: <http://www.ceps-as.cz/cs/produkty/rehabilitace-potrubni.html>
- [39] *Ceps: Sušení plynovodů před uvedením do provozu* [online]. b.r. [cit. 2016-05-31].
Dostupné z: <http://www.ceps-as.cz/cs/produkty/suseni-potrubni.html>
- [40] LINHART, V. a P. STARKA *Creepové zkoušky za studena materiálu odebraného z tlakového tělesa DN 500: Technická zpráva SVÚM a.s.: 13004494*. Praha, 2002.
- [41] GAJDOŠ, Ľubomír, Martin ŠPERL a Petr PAŘÍZEK. Rozvoj plastických deformací v oceli při konstantním zatížení a jejich význam pro plynárenskou praxi: Development of Plastic Deformations in Steel under Constant Load and Their Importance for Practice in the Gas Industry. *Plyn*. 2013, **93**(9), 198-203. ISSN 00321761.
- [42] FAZZINI, Pablo a Jose´ OTEGUI. Influence of old rectangular repair patches on the burst. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2006, **83**(1), 27-34.
DOI: 10.1016/j.ijpvp.2005.10.004.
- [43] LEI, Z.Q., J. CHEN, F.X. WANG, W.B. XUAN a H. YUAN Full-scale Burst Test and Finite Element Simulation of 32 Inch Oil Pipe with Girth Weld Defects. *Pressure Vessel Technology: Preparing for the Future*. 2015, **130**(1), 911–917.
DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.240.
- [44] MOUSTABCHIR, H., Z. AZARI, S. HARIRI a I. DMYTRAKH Experimental and numerical study of stress–strain state of pressurised cylindrical shells with external defects. *Engineering Failure Analysis*. 2010, **17**(2), 506–514. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2009.09.011.
- [45] MERIEM-BENZIANE, Madjid, Sabah ABDUL-WAHAB, Hamou ZAHLOUL, Benoauda BABAZIANE, Mohamed HADJ-MELIANI a Guy PLUVINAGE. Finite element analysis of the integrity of an API X65 pipeline with a longitudinal crack repaired with single- and double-bonded composites. *Composites Part B: Engineering*. 2015, **77**, 431-439.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.008>. ISSN 13598368.
Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836815001274>
- [46] LINHART, Václav, Romana PAVELKOVÁ a Václav HERMAN. K vlivu objímek "clock spring" u
-

- plynovodního potrubí s vadami v obvodovém svaru při přídavném ohybovém namáhání. *Plyn*. 2010, **90**(5), 102-106. ISSN 00321761.
- [47] LINHART, Václav a Romana PAVELKOVÁ. K ochrannému účinku objímek na únosnost vysokotlakých potrubí: On the Protective Effect of Sleeves on the Strength of High-pressure Pipelines. *Plyn*. 2014, **94**(4), 81-89. ISSN 00321761.
- [48] ČERNÝ, I. a J. SÍS *Tlaková zkouška trubky DN300 s analýzami defektů, deformací, materiálu a destrukčních mechanismů: Technická zpráva SVÚM a.s.: 1530 100 - 3*. Čelákovice, 2015.
- [49] VÍTÁMVÁS, Zdeněk. *Moderní metody používané v defektoskopii* [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-06-01]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15173. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. MARTIN JULIŠ, Ph.D.
- [50] ČSN EN 10 020. *Číselné označování a rozdělení ocelí ke tváření*. Praha. Ústav pro normalizaci a měření, 1976.
- [51] ČSN ISO 4967 (420471). *Ocel - Stanovení obsahu nekovových vměstků - Mikrografická metoda využívající normovaná zobrazení*. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [52] ČSN EN ISO 643 (420462). *Ocel - Mikrografické stanovení velikosti zrn*. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [53] ČSN EN ISO 6892-1 (420310). *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [54] ČSN EN 10208-2 (42 1907). *Ocelové trubky pro potrubí na hořlavá média - Technické dodací podmínky - Část 2: Trubky s požadavky třídy B*. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [55] ČSN EN ISO 12737 (420348). *Kovové materiály - Stanovení lomové houževnatosti při rovinné deformaci*. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [56] ČSN 42 0347. *Skúšanie kovov: LOMOVÁ HÚŽEVNATOSŤ KOVOV PRI STATICKOM ZAŤAŽENÍ*. Federální úřad pro normalizaci a měření, 1990.
-

- [57] NEWMAN, J. Fracture analysis of surface- and through-cracked sheets and plates. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 1973, **5**(3), 667-689 [cit. 2016-07-04]. DOI: 10.1016/0013-7944(73)90046-5. ISSN 0013-7944. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/0013794473900465>
- [58] ČSN EN 12266-1 (13 3003). *Průmyslové armatury - Zkoušení armatur - Část 1: Tlakové zkoušky, postupy zkoušek a přijímací kritéria - Závazné požadavky*. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [59] *Plynovody a přípojky z oceli s nejvyšším provozním tlakem do 100 barů včetně: G 702 04*. Český plynárenský svaz, 2006. ISSN 978-80-7328-081-9.

12 Seznam obrázků

Obr. 1.1	Ilustrativní foto nejmodernějšího plynovodu v ČR – Gazela s DN 1400 a PN84 [2]	12
Obr. 1.2	Mapa transitního a vnitrostátního plynovodu [5]	13
Obr. 2.1	Speciální nůžkový přípravek [11]	18
Obr. 3.1	Schéma výstřednosti trubky [15]	21
Obr. 3.2	Zdvojení stěny trubky DN 300 [16]	21
Obr. 3.3	Speciální svařovací robot pro tvorbu svarů pod tavidlem metodou SAW [18]	23
Obr. 3.4	Schéma střechovitosti svarů [1]	24
Obr. 3.5	Ohýbání trubek za tepla [19]	24
Obr. 3.6	Průběh napětí při ohybu [15]	25
Obr. 3.7	Schéma ovality [15]	26
Obr. 3.8	Schéma zvlnění [15]	26
Obr. 4.1	Schéma kruhově zakřiveného úseku	28
Obr. 4.2	Průběh obvodového napětí v oblouku	29
Obr. 4.3	Interakce dvou korozních důlků v obvodovém směru [25]	31
Obr. 4.4	Mikrostruktura koroze za napětí [27]	32
Obr. 4.5	Wöhlerova křivka [29]	34
Obr. 5.1	Odběr vyříznutého vzorku pro tlakovou zkoušku [38]	36
Obr. 5.2	Přivaření zaslepovacích den na volné konce po vyříznutí vzorku pro tlakovou zkoušku [39]	36
Obr. 5.3	Tlaková zkouška únosnosti záplat [42]	39
Obr. 5.4	Tlaková zkouška únosnosti obvodových svarů [43]	39
Obr. 5.5	Porovnání experimentálních dat a MKP simulací [44]	40
Obr. 6.1	Dodané segmenty potrubí DN300	42
Obr. 6.2	Nejdelší trhлина na potrubním tělese 1	43
Obr. 6.3	Dva svařené segmenty DN300 se dny pro tlakovou zkoušku	43
Obr. 6.4	Rozměry základní geometrie tělesa	44
Obr. 6.5	Grafické znázornění výsledků měření tloušťky stěny (tmavě modrá vyznačená oblast s nejmenší tloušťkou stěny)	45
Obr. 6.6	Řádkovitá feriticko – perlitická struktura trubky DN300	47
Obr. 6.7	Indikace č. 2	48
Obr. 6.8	Indikace č. 4	48
Obr. 6.9	Indikace č. 7	49

Obr. 6.10 Indikace č. 12	50
Obr. 6.11 Indikace č. 19	50
Obr. 6.12 Indikace č. 20	51
Obr. 6.13 Indikace č. 25	52
Obr. 6.14 Indikace č. 32	52
Obr. 6.15 Závislost velikosti hloubky trhliny na vnitřním přetlaku.....	61
Obr. 7.1 Ilustrativní obrázek umístění tenzometru na indikované vadě č. 7	62
Obr. 7.2 Schéma rozmístění tenzometrů na tělese připravené k tlakové zkoušce	63
Obr. 7.3 Závislost obvodových deformací na vnitřním přetlaku při prvním zatěžování na pracovní tlak 7.35 MPa na přímé části zkušebního tělesa.....	64
Obr. 7.4 Závislost podélných deformací na vnitřním přetlaku při prvním zatěžování na pracovní tlak 7.35 MPa na přímé části zkušebního tělesa.....	65
Obr. 7.5 Závislost obvodových deformací na vnitřním přetlaku při prvním zatěžování na pracovní tlak 7.35 MPa na zahnuté části tělesa	65
Obr. 7.6 Závislost podélných deformací na vnitřním přetlaku při prvním zatěžování na pracovní tlak 7.35 MPa na zahnuté části tělesa	66
Obr. 7.7 Reziduální deformace po jednotlivých etapách zatěžování, (1) – po prvním zatěžovacím cyklu, (2) po 200 cyklech, (3) po 800 cyklech, (4) po 1000 cyklech	68
Obr. 7.8 Časový průběh zvyšování tlaku do destrukce.....	69
Obr. 7.9 Závislost obvodových deformací na vnitřním přetlaku při zkoušce do destrukce na přímé části zkušebního tělesa	70
Obr. 7.10 Závislost podélných deformací na vnitřním přetlaku při zkoušce do destrukce na přímé části zkušebního tělesa	70
Obr. 7.11 Závislost obvodových deformací na vnitřním přetlaku při zkoušce do destrukce na zahnuté části zkušebního tělesa	71
Obr. 7.12 Závislost podélných deformací na vnitřním přetlaku při zkoušce do destrukce na zahnuté části zkušebního tělesa	71
Obr. 8.1 Trubka DN300 po destrukci	73
Obr. 8.2 Oblast iniciace trhliny a nejbližší trhlina č. 14	73
Obr. 8.3 Oblast iniciace lomu na vnějším povrchu trubky	74
Obr. 8.4 Část kruhového důlku, kterém iniciovala únavová trhlinka	75
Obr. 8.5 Vnitřní povrch důlku s okolní únavovou trhlinou	75
Obr. 8.6 Obroušená vyvýšená oblast okolo důlku s velikostí korespondující s únavovou trhlinou	76
Obr. 9.1 Indikace č. 4	77

Obr. 9.2 Indikace č. 10.....	78
Obr. 9.3 Indikace č. 11.....	78
Obr. 9.4 Indikace č. 14.....	79
Obr. 9.5 Indikace č. 15.....	79

13 Seznam tabulek

Tab. 6.1 Výsledky měření tloušťky stěny.....	46
Tab. 6.2 Obsahy základních prvků.....	47
Tab. 6.3 Rozměry zkušebních tyčí před a po zkoušce	53
Tab. 6.4 Výsledky tahové zkoušky	53
Tab. 6.5 Rozměry zkušebních tělísek a výsledky zkoušky rázem v ohybu.....	54
Tab. 6.6 Rozměry zkušebních tělísek a hodnoty lomové houževnatosti za rovinné deformace	56
Tab. 6.7 Rozměry zkušebních tělísek a hodnoty lomové houževnatosti stanovené pomocí metody kritického otevření trhliny.....	58
Tab. 6.8 Hodnoty kritické hodnoty J_{Ic} a výsledky lomové houževnatosti K_{Ic}	59