

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 880

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Jan Poduška

**Vliv reziduálních napětí
na odhad životnosti
polymerních trubek**



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

**VLIV REZIDUÁLNÍCH NAPĚTÍ NA ODHAD
ŽIVOTNOSTI POLYMERNÍCH TRUBEK**

**INFLUENCE OF RESIDUAL STRESS ON LIFETIME PREDICTION
OF POLYMER PIPELINES**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

OBOR	Inženýrská mechanika
AUTOR PRÁCE	Ing. Jan Poduška
ŠKOLITEL	doc. Ing. Pavel Hutař, Ph.D.
OPONENTI	doc. Ing. Eva Nezbedová, CSc. Ing. Lucie Malíková, Ph.D.
DATUM OBHAJOBY	26. června 2019

Brno 2019

Klíčová slova:

plastové trubky, životnost, šíření creepové trhliny, metoda konečných prvků, simulace šíření trhliny, lineárně-elastická lomová mechanika, cracked round bar test

Keywords:

plastic pipes, lifetime, slow crack growth, finite element method, crack growth simulation, linear-elastic fracture mechanics, cracked round bar test

Místo uložení práce

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2
616 69 Brno

Výzkumná činnost byla realizována v rámci Strategie AV21 Akademie věd ČR. Úkoly týkající se dizertační práce byly realizovány s využitím zařízení Velké infrastruktury pro výzkum, experimentální vývoj a inovace – projekt IPMinfra, LM2015069, a v souvislosti s řešením projektu CEITEC 2020, číslo projektu LQ1601, poskytovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory z prostředků Národního programu udržitelnosti II.

© Jan Poduška, 2019

ISBN 978-80-214-5771-3

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 PORUŠOVÁNÍ PLASTOVÝCH TRUBEK.....	6
2.1 Tvárné porušení.....	6
2.2 Kvazi-křehké porušení	7
2.3 Porušení stárnutím a chemickou degradací.....	7
3 REZIDUÁLNÍ NAPĚTÍ V PLASTOVÝCH TRUBKÁCH.....	7
4 URČENÍ ŽIVOTNOSTI PLASTOVÝCH TRUBEK.....	9
4.1 Hydrostatická tlaková zkouška	9
4.2 Stanovení životnosti na základě LELM	9
4.2.1 Postup určení rychlosti šíření trhliny pomocí CRB testu	10
5 CÍLE PRÁCE	11
6 POSTUP ŘEŠENÍ A VYBRANÉ DOSAŽENÉ VÝSLEDKY.....	12
6.1 Detailní popis reziduálního napětí	13
6.2 Zjednodušení metodiky určení reziduálního napětí	15
6.3 Vliv reziduálního napětí na životnost	16
6.4 Vliv reziduálního napětí na šíření trhliny v CRB vzorku	17
6.4.1 Reziduální napětí v CRB vzorcích	17
6.4.2 Numerický model šíření trhliny v CRB vzorku a výsledky.....	18
6.5 Životnost trubky při provozním zatížení.....	20
7 ZÁVĚR.....	22
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	26
9 CURRICULUM VITAE	29
10 ABSTRACT	30

1 ÚVOD

Plastové trubky jsou používány v praxi již více než 50 let. Jejich aplikace zahrnují kanalizaci, zavlažování, rozvody vody a zemního plynu, ochranu kabelů a další průmyslové aplikace. Nejčastěji je možné se setkat s trubkami z termoplastů – polyvinylchloridu (PVC), polyetylenu (PE) a polypropylenu (PP). Pro specifické aplikace se používají i další typy termoplastů.

Plastové trubky se prosazují na úkor ostatních trubek především díky mnoha výhodným vlastnostem. Podstatnou výhodou nejen trubkových plastů je jejich odolnost proti koroznímu poškození, a to i v agresivních prostředích, což značně snižuje náklady spojené s údržbou a ochranou povrchů trubek pomocí nátěrů a jiných protikorozních povrchových úprav [1]. Díky hladkému povrchu jsou trubky odolnější také proti abrazivnímu poškození [1] a mají menší hydraulický odpor [2]. Nízká hmotnost plastových trubek usnadňuje manipulaci a montáž [1]. Trubky lze také velmi snadno spojovat využitím opakovatelné tavitelnosti termoplastických materiálů [2]. Jak samotné trubky, tak spoje jsou navíc perfektně těsné a nedochází k únikům přepravovaných médií. Na rozdíl od ocelových nebo betonových trubek lze plastové trubky výrazněji deformovat, aniž dojde k poškození nebo plastické deformaci. To je výhodné především u trubek zakopaných v zemi, které jsou tím odolnější vůči pohybům podloží a snesou větší zatížení [1, 2]. Naprosto zásadní je vysoká houževnatost plastových trubek a odolnost proti šíření trhlin. Tato vlastnost v kombinaci s výše zmíněnou chemickou odolností dává plastovým trubkám jejich největší výhodu – velmi dlouhou životnost.

Vysoká životnost plastových trubek, která u nejnovějších šarží podle odhadů s největší pravděpodobností přesáhne 100 let [3], je výzvou při testování trubek, neboť je nutné prokázat schopnost dosáhnout takto dlouhé životnosti, a přitom test provést v co nejkratším čase. Dostatečně přesný a konzervativní odhad životnosti je důležitý především u plastových trubek, které jsou v provozu zatíženy vnitřním přetlakem. K testování dosažitelné životnosti tlakových plastových trubek doposud sloužila především hydrostatická tlaková zkouška, z jejíchž výsledků je možné pro testované trubky odhadnout životnost na základě předpokládané velikosti obvodového napětí ve stěně trubky při provozu [4, 5]. Tento typ zkoušky je však u moderních materiálů značně časově náročný. Vzhledem k tomu, že nejčastěji dochází k porušení trubky mechanismem pomalého šíření creepové trhliny (v literatuře se označuje zkratkou SCG = *slow crack growth*), lze životnost při znalosti rychlosti šíření trhliny v daném materiálu také odhadnout výpočtem na základě postupů lineárně elastické lomové mechaniky [6]. Rychlost šíření trhliny se určuje různými typy zrychlených zkoušek na vrubovaných vzorcích vyrobených přímo z trubky případně speciálně připravených z lisovaných desek daného materiálu. Do výpočtu odhadu životnosti je pak nutné zahrnout různé parametry ovlivňující životnost, mezi které patří reziduální napětí v dané trubce a další specifické typy zatížení, kterým může být trubka vystavena.

Reziduální napětí, axiální a obvodové, vzniká ve stěně trubky při výrobě, když trubka vytvořená z roztaveného materiálu postupně tuhne [7]. Reziduální napětí svým nepříznivým průběhem ještě zvyšuje celkové napětí ve stěně trubky při provozu

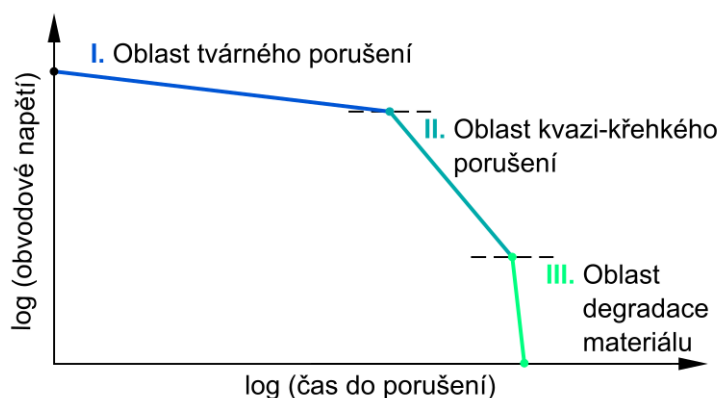
a negativně ovlivňuje životnost, neboť napomáhá šíření creepové trhliny. Za účelem zahrnutí tohoto vlivu do výpočtu životnosti trubky je důležité mít k dispozici přesný popis rozdělení reziduálního napětí ve stěně trubky a efektivní metodu jeho určení.

Vliv na životnost mají také další faktory. Je-li trubka zakopána v zemi, je vhodné ve výpočtu zahrnout také zatížení způsobené tlakem zeminy a zatížení povrchu nad trubicí (např. dopravními prostředky).

2 PORUŠOVÁNÍ PLASTOVÝCH TRUBEK

K testování odolnosti trubek vůči působení vnitřního přetlaku se používá tzv. *hydrostatická tlaková zkouška* podle ISO 1167-1 [4]. Ta spočívá v zatížení testovaných částí trubek vnitřním přetlakem a měření času do porušení, tj. do okamžiku, kdy trubka ztratí těsnost [1–3, 7].

Výsledky hydrostatické tlakové zkoušky se vynášejí do logaritmických souřadnic jako závislost obvodového napětí na času do porušení někdy nazývaná *hydrostatická tlaková křivka* (*hydrostatic pressure curve*) [3]. Typický tvar takové křivky, který by bylo možné získat při dostatečně dlouhém zatěžování trubek různými vnitřními tlaky, je na Obr. 1.



Obr. 1 – Schematicky znázorněná křivka závislosti obvodového napětí v trubce na času do porušení při hydrostatické tlakové zkoušce, podle [8]

V závislosti na velikosti působícího tlaku, a tím i velikosti obvodového napětí ve stěně trubky, se mění mechanismus, kterým dochází k porušení trubky. Na křivce je možné určit tři úseky, které odpovídají třem základním mechanismům porušení [1, 2, 8–12]. Tyto mechanismy jsou stručně popsány v následujícím textu.

2.1 TVÁRNÉ PORUŠENÍ

První úsek křivky je oblastí poměrně vysokých obvodových napětí a krátkých časů do porušení. Při velkém zatížení dojde k porušení trubky téměř okamžitě nebo po kratší době provozu. V určitém slabém místě na stěně trubky (např. v místě defektu nebo jinak zeslabené stěny) dojde k překročení meze kluzu materiálu a velké plastické deformaci, která vede k lokálnímu výraznému zeslabení stěny, následnému vyboulení působením vnitřního přetlaku a konečnému porušení zeslabeného materiálu [3, 8, 11, 12]. Toto porušení se u trubek používaných v praxi vyskytuje zřídka, neboť pracovní

tlaky obvykle nejsou dostatečně vysoké, aby dokázaly vyvolat ve stěně trubky napětí překračující mez kluzu.

2.2 KVAZI-KŘEHKÉ PORUŠENÍ

Se snižujícím se obvodovým napětím dochází k nárůstu času do porušení, a především k podstatné změně mechanismu porušení z tvárného na tzv. *kvazi-křehký* [12]. Oblast kvazi-křehkých porušení má na hydrostatické tlakové křivce strmější sklon – změnou velikosti zatížení tedy nedojde k výrazné změně času do porušení. Zlom na křivce mezi oblastmi tvárného a kvazi-křehkého porušení je důležitým bodem, který je nutné při testování trubek hydrostatickou tlakovou zkouškou určit.

Kvazi-křehké porušení probíhá jako iniciace creepové trhliny z defektu na vnitřním povrchu trubky a jejího šíření. To probíhá tzv. *mechanismem pomalého šíření trhliny* (označuje se SCG – *slow crack growth*) [8–13].

Porušení trubky mechanismem SCG při statickém zatížení lze rozdělit do 3 fází [8]:

1. *Iniciace trhliny*

2. *Pomalý růst trhliny (SCG)*

3. *Konečné porušení a ztráta těsnosti trubky*

Iniciace trhliny nastává v okamžiku, kdy působením napětí dojde k vytvoření mikroskopické dutinky v oblasti koncentrace napětí způsobené defektem v materiálu, tvarem součásti nebo připraveným vrubem, jedná-li se o testovací vzorek [8, 14].

Zvětšováním a spojováním dutinek se postupně začne tvořit charakteristická procesní zóna tvaru klínu, tzv. *krejz* [12, 15, 16]. Krejz je orientován kolmo na rovinu největšího tahového napětí. Je to útvar tvořený dvěma povrchy základního materiálu, které jsou přemostěny malým objemem plasticky deformovaného materiálu, jenž u špičky tvoří strukturu s dutinami a postupně přechází do struktury vysoce tažených vláken (fibril) a membrán [17–19]. K vlastnímu šíření trhliny dochází opakovaným porušováním fibrilární části krejzu a následným rozšiřováním krejzu.

Konečné porušení proběhne, když se čelo rostoucí trhliny přiblíží pod vnější povrch trubky. Tento proces je velmi rychlý a probíhá nejčastěji tvárným porušením.

2.3 PORUŠENÍ STÁRNUTÍM A CHEMICKOU DEGRADACÍ

V oblasti velmi nízkých napětí dochází k porušení trubky až po velmi dlouhé době zatížení. Toto porušení je téměř nezávislé na působícím napětí. Důsledkem postupného stárnutí materiálu a ztráty původních mechanických vlastností (často vlivem chemické agresivity přepravovaného média) dochází k iniciaci šíření trhlín. [3, 8, 10, 12]

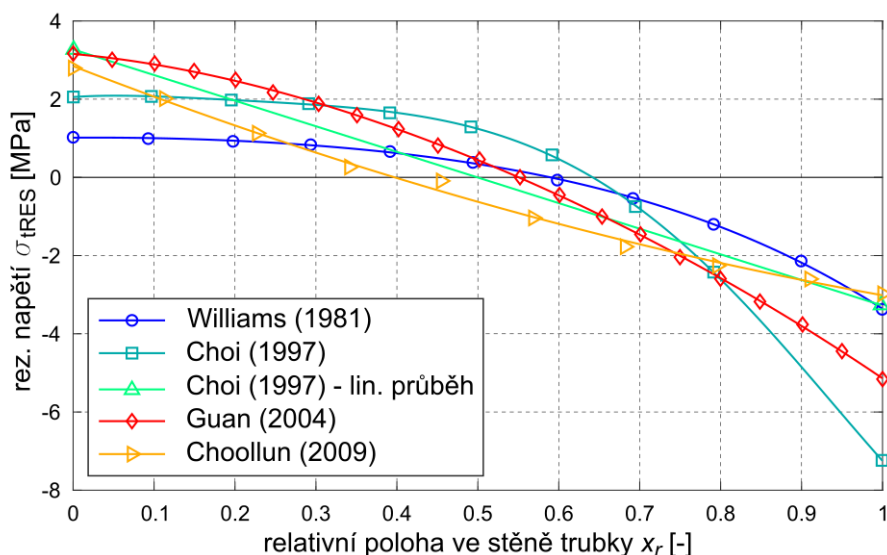
3 REZIDUÁLNÍ NAPĚTÍ V PLASTOVÝCH TRUBKÁCH

Polymerní trubky jsou vyráběny procesem kontinuální extruze. Materiál je dodán ve formě granulí, které jsou pomocí násypky přivedeny do tzv. *extrudéru*, kde se působením tepla roztaví. Extrudér je dlouhá vyhřívaná komora vybavená šnekem. Šnek vytlačuje roztavený materiál přes jednoduchou formu ven z extrudéru. Vytvarovaný

materiál je následně chlazen vodou a tuhne. Fáze tuhnutí je zdrojem vzniku reziduálních napětí ve stěně polymerní trubky. Materiál na vnějším povrchu, který je chlazen vodou, ztuhne dříve a dojde k jeho smrštění. Materiál na vnitřním povrchu tuhne později a také má tendenci se smrstit, avšak vnější ztuhlá vrstva již neumožní další deformaci. Tím dochází ke vzniku reziduálního napětí v obvodovém a axiálním směru. [2, 3, 7, 20]

Na Obr. 2 jsou v grafu vykresleny experimentálně získané průběhy obvodového reziduálního napětí σ_{tRES} v PE trubkách, které lze nalézt v pracích [21–24]. Na základě těchto a dalších měření lze říct, že obvodové reziduální napětí se pohybuje v určitém rozmezí hodnot. Na vnitřním povrchu je tahové (kladné) reziduální napětí od 1 do 3 MPa, na vnějším povrchu pak tlakové (záporné) napětí od -3 až do -7 MPa.

Axiální reziduální napětí je velikostí a průběhem velmi podobné obvodovému napětí. Obvodové a axiální napětí se navzájem ovlivňují, a proto nelze nikdy axiální napětí vypustit a uvažovat pouze obvodové, i když to je z hlediska vlivu na šíření trhliny podstatnější. [25, 26]



Obr. 2 – Porovnání různých průběhů obvodového reziduálního napětí nalezených v literatuře

Obvyklé hodnoty reziduálního napětí nejsou na první pohled vysoké, avšak jsou srovnatelné s hodnotami obvodového napětí, které se ve stěně trubky běžně nachází. Například maximální obvodové napětí způsobené vnitřním přetlakem ve stěně trubky třídy PE100 může být 10 MPa, aby tato trubka vydržela v provozu 50 let. Reziduální napětí tedy obvykle zvyšuje hodnotu tahového obvodového napětí na vnitřním povrchu trubky o 10 % a více, a proto ho nelze jednoduše zanedbat.

Určení obvodového reziduálního napětí lze provést několika způsoby. Nejjednodušší a také nejpoužívanější metodou je *metoda rozříznutých kroužků*, kdy se obvodové napětí určí z deformace kroužků uříznutých z trubek [21, 26]. V literatuře je dokumentováno použití dalších metod – především *odvrtávací metody* [22], *tenzometrických měření* deformace obdélníkových vzorků ze stěny trubky [23, 27] a *reflexní fotoelasticimetrie* [24].

4 URČENÍ ŽIVOTNOSTI PLASTOVÝCH TRUBEK

4.1 HYDROSTATICKÁ TLAKOVÁ ZKOUŠKA

Odolnost trubkových materiálů proti porušení mechanismem SCG je určující pro jejich životnost. Otestovat odolnost proti SCG je možné několika způsoby. Jedním je tzv. hydrostatická tlaková zkouška, jejíž provedení je specifikováno v normě ISO 1167-1 [4] a je velmi jednoduché. Jednotlivé úseky trubek jsou z obou stran opatřeny tlakovými uzávěry. Uvnitř trubek je voda, natlakované trubky jsou buď ponořeny v kádi s vodou o určené teplotě nebo uloženy ve vyhřívané komoře. Měří se čas do porušení. Časy do porušení jsou velmi dlouhé, což se řeší provedením zkoušek za vyšších teplot. Vyšší teplota urychluje šíření trhlin. Z těchto výsledků se pak extrapoluje chování za pokojové teploty. Z extrapolovaných výsledků hydrostatických tlakových zkoušek je možné orientačně odhadnout životnost používané plastové trubky při známém zatížení trubky.

Odolnost proti SCG lze určit také pomocí tzv. zrychlených testů, které byly vyvinuty, protože pro moderní materiály trvá provedení hydrostatických tlakových zkoušek příliš dlouho – jedná se především o *Pennsylvania Edge Notch Tensile* (PENT) test, *Full-Notch Creep Tensile* (FNCT) test a *Cracked Round Bar* (CRB) test. Tyto testy však postrádají velkou výhodu hydrostatické tlakové zkoušky – z jejich výsledků nelze přímo odhadnout životnost testovaných trubek.

4.2 STANOVENÍ ŽIVOTNOSTI NA ZÁKLADĚ LELM

Metoda stanovení odhadu životnosti plastové trubky, kterou je možné nahradit zdoluhavé tlakové zkoušky je založena na koncepci součinitele intenzity napětí *lineárně-elastické lomové mechaniky* (LELM). K popisu pole napětí před čelem trhliny šířící se v polymerním materiálu mechanismem SCG lze použít součinitel intenzity napětí K_I definovaný pro těleso konečných rozměrů jako:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} Y \quad (1)$$

kde σ je nominální napětí působící v místě trhliny, a je délka trhliny, Y je tvarová funkce, která popisuje geometrii tělesa [28]. U trhliny šířící se mechanismem SCG je splněna podmínka malé plastické zóny před čelem trhliny.

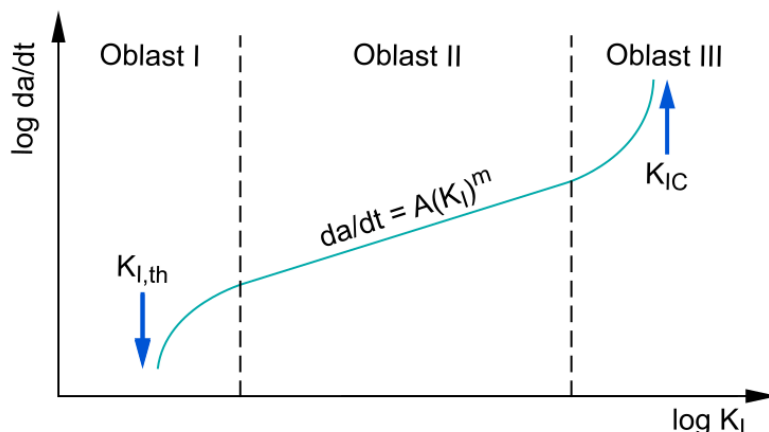
Rychlost šíření trhliny mechanismem SCG závisí na součiniteli intenzity napětí podobně jako rychlost šíření únavové trhliny v kovových materiálech. Tato závislost má v logaritmických souřadnicích typický esovitý tvar schematicky vykreslený na Obr. 3 [6, 29].

Důležitá je především oblast II, kde je závislost v logaritmických souřadnicích lineární a lze ji tedy popsat mocninnou závislostí:

$$\frac{da}{dt} = A(K_I)^m \quad (2)$$

kde da/dt je rychlost šíření trhliny, A a m jsou materiálové konstanty určené měřením rychlosti růstu trhliny na vzorcích (např. při CRB testu) a K_I je součinitel intenzity napětí. Pokud existuje pro daný materiál křivka závislosti rychlosti šíření trhliny na

součiniteli intenzity napětí, pak lze integrací rovnice (2) vypočítat čas t_{SCG} , po který se trhlina šíří v trubce mechanismem SCG z určité počáteční délky a_{ini} do konečné délky a_{fin} [13, 29]. Kromě naměřené závislosti da/dt na K_I je také potřeba získat závislost součinitele intenzity napětí na délce šířící se trhliny v trubce. Tuto závislost je možné získat simulací šíření trhliny pomocí metody konečných prvků [6]. Je důležité při určování této závislosti zahrnout do modelu různé typy zatížení, aby byl výpočet životnosti co nejbližší realitě.

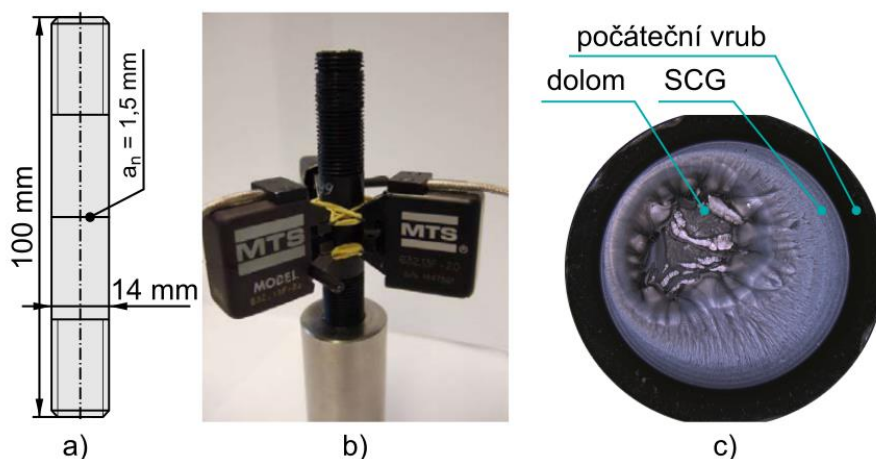


Obr. 3 – Schematické znázornění křivky závislosti rychlosti šíření creepové trhliny na součiniteli intenzity napětí

4.2.1 Postup určení rychlosti šíření trhliny pomocí CRB testu

V textu výše bylo zmíněno měření rychlosti šíření trhliny, tedy parametrů A a m , pomocí CRB (*Cracked Round Bar*) testu. Tento poměrně nový test je standardizován normou ISO 18489 [30], která specifikuje tvar a rozměry vzorku a jeho zatížení. CRB test se provádí na vzorcích tvaru válce, které mohou být vyrobeny přímo ze stěny polymerní trubky nebo ze speciálně připravených desek. Uprostřed vzorku je pomocí žiletky vytvořen ostrý vrub po celém obvodu. Schéma vzorku s rozměry je na Obr. 4. Vzorky jsou zatíženy cyklickým tahem, cyklus je sinusový s asymetrií cyklu $R = 0,1$ (typ tah-tah), což výrazně urychluje mechanismus SCG a vede k značným úsporám času.

CRB test je možné použít i ke zjištění rychlosti šíření trhliny mechanismem SCG v daném materiálu. Koncept tohoto měření je popsán v článkách Pintera a Franka [13, 29, 31]. Válcový tvar vzorku neumožňuje přímé sledování růstu trhliny a měření její délky, a proto je místo délky trhliny měřeno otevření trhliny (COD – *crack opening displacement*) na okraji vrubu pomocí extenzometru, z něhož je délka trhliny následně vypočtena na základě předem změřené poddajnosti (viz Obr. 4b). Na CRB vzorku lze navíc změřit pouze šíření trhliny při cyklickém zatížení, rychlost šíření trhliny při statickém zatížení je extrapolována z několika měření při různých asymetriích cyklu.



Obr. 4 – Schéma vzorku pro CRB test (a), fotografie uspořádání CRB testu při měření otevření trhliny pomocí extenzometrů (b) a typická asymetrická lomová plocha CRB vzorku (c)

V souvislosti s CRB testy je nutné věnovat pozornost podobě výsledné lomové plochy válcových vzorků. Na každé lomové ploše lze zpravidla rozlišit hladký povrch počátečního uměle vytvořeného vrubu, oblast šíření trhliny mechanismem SCG a oblast výraznější plastické deformace po konečném lomu vzorku, která se vyznačuje většími důlky a výrazně taženým materiálem (viz Obr. 4c). Často dochází k tomu, že výsledná lomová plocha má více nebo méně asymetrický charakter – tj. na vzorku lze určit stranu, na které se trhlina šířila rychleji než na straně opačné a kruhové postupové čáry nejsou přesně uprostřed. Je to pravděpodobně způsobeno kombinací příčin jako přídavný ohyb při nesprávném upnutí vzorku nebo reziduální napětí. Nebyl však zkoumán vliv této asymetrie na měření rychlosti šíření trhliny.

5 CÍLE PRÁCE

Z hlediska vlivu na životnost trubky je nejdůležitější obvodové reziduální napětí. Experimentální metoda, kterou lze zjistit co nejpřesnější tvar rozdělení obvodového reziduálního napětí ve stěně trubky, musí být dostatečně jednoduchá a rychlá, aby mohla být používána i v praxi. Metody publikované v literatuře spočívají zejména v měření deformace kruhových vzorků odříznutých z trubky s předpokladem lineárního rozložení napětí po stěně trubky. Výsledná rozložení reziduálního napětí získaná tímto postupem zpravidla přeceňují velikost reziduálních napětí na vnitřní stěně trubky, zatímco podceňují velikost reziduálního napětí na vnější stěně trubky. Proto je jedním z hlavních cílů dizertační práce zjednodušení metodiky určování skutečného rozdělení obvodových reziduálních napětí při současném zachování jednoduchosti provedení experimentálního testu.

Znalost celkového stavu reziduálních napětí ve stěně trubky vyžaduje také určení axiálního reziduálního napětí, o kterém je však v dostupné literatuře poměrně málo informací. Jedním z cílů tedy také musí být popis axiálního reziduálního napětí a jejich vlivu na celkovou napjatost ve stěně trubky.

Reziduální napětí má vliv na životnost trubky, neboť ovlivňuje rychlost šíření creepových trhlin ve stěně trubky. Dizertační práce se bude také zabývat kvantifikací

vlivu reziduálních napětí na životnost trubek. Za tím účelem je potřeba modelovat šíření trhliny v trubce za podmínek hydrostatické tlakové zkoušky a za přítomnosti reziduálních napětí. Stejným způsobem bude zkoumán i vliv zatížení od zeminy nebo přídavného zatížení od vozovky, tak aby bylo možno odhadnout životnost potrubí i v reálných provozních podmínkách.

Protože parametry popisující rychlost pomalého šíření trhliny se stanovují pomocí zrychlených zkoušek polymerních materiálů (zejména pomocí CRB testu) je třeba kvantifikovat vliv reziduálního napětí na výsledky těchto testů v případech, kdy jsou experimentální tělesa vyrobena přímo ze stěny trubky.

Cíle dizertační práce lze shrnout do následujících bodů:

1. *Detailní popis reziduálního napětí ve stěně polymerní trubky*

Na základě komplexních experimentů popsat průběh a velikost reziduálního napětí v polymerních trubkách a porovnat tyto výsledky s literaturou.

2. *Zjednodušení metodiky určování reziduálního napětí*

Zjednodušit dostupnou metodiku určení obvodového reziduálního napětí (toto napětí je nejdůležitější pro následný odhad životnosti) tak, aby bylo možné použít k relativně přesnému odhadu obvodového reziduálního napětí pouze jeden vzorek.

3. *Kvantifikace vlivu reziduálního napětí na životnost trubky*

Zavést zjištěné reziduální napětí do výpočtů životnosti polymerní trubky a modelovat tak hydrostatický tlakový test.

4. *Stanovení vlivu provozních zatížení na životnost trubky*

Zohlednit externí zatížení ve výpočtu životnosti polymerní trubky, se zaměřením na vnější zatížení od zeminy nebo přídavné zatížení od vozovky nad potrubím.

5. *Posouzení vlivu reziduálního napětí na výsledky zrychlených zkoušek polymerních materiálů*

Porovnání skutečných výsledků zrychlených testů se simulacemi metodou konečných prvků s cílem stanovit vliv reziduálních napětí na výsledky těchto zkoušek.

6 POSTUP ŘEŠENÍ A VYBRANÉ DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Tato práce řeší tři hlavní témata, která spojuje způsob odhadu životnosti trubek založený na lineárně elastické lomové mechanice. Prvním a největším tématem je popis reziduálního napětí ve stěně tlakových polyetylenových a polypropylenových trubek, metody jeho určování a vlastní vliv na životnost trubek. Jsou popsány experimenty provedené na polypropylenových a polyetylenových trubkách za účelem zjištění obvodového a axiálního reziduálního napětí a metody jejich vyhodnocení. Metody vyhodnocení jsou také ověřeny pomocí simulace chování experimentálních těles

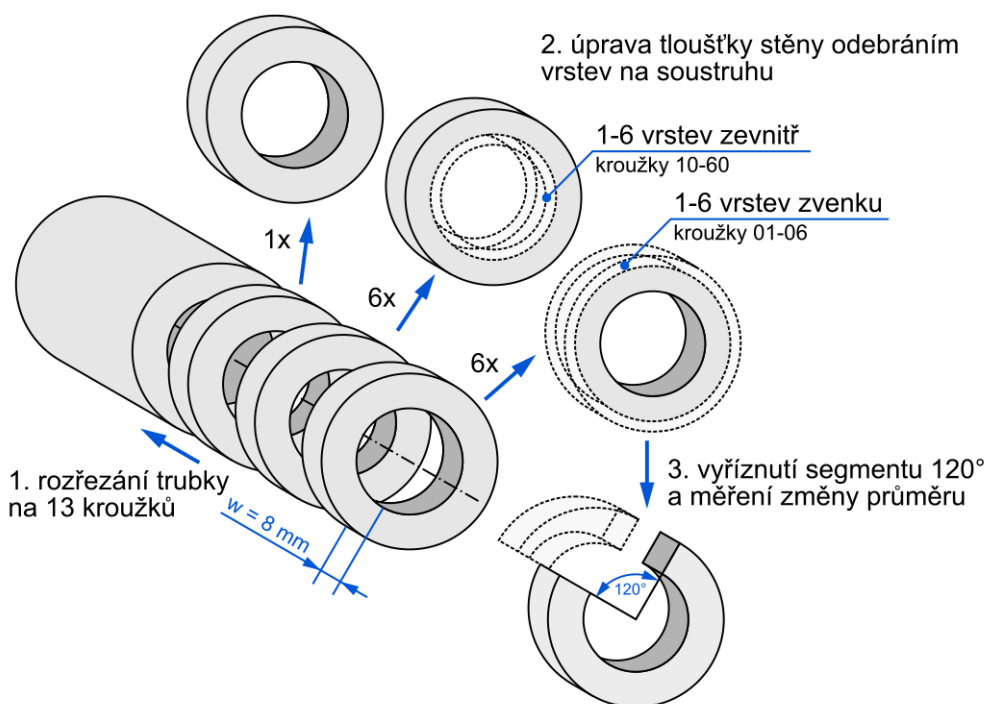
metodou konečných prvků. Získané výsledky jsou použity ve výpočtech odhadů životnosti a je diskutován vliv reziduálního napětí na životnost.

Druhým tématem je vliv reziduálního napětí na výsledky měření rychlosti růstu trhliny ve vzorcích vyrobených ze stěny trubky. Při tomto měření může totiž vlivem reziduálního napětí docházet ke zkreslení parametrů popisujících závislost rychlosti šíření trhliny, která je potřebná pro výpočet životnosti. Možné ovlivnění výsledků experimentu je hodnoceno na základě numerické simulace šíření trhliny ve vzorku metodou konečných prvků.

Třetím tématem je odhad životnosti plastové trubky při kombinaci zatížení, která odpovídá stavu při skutečném provozu trubek. Do této kombinace zatížení je zavedeno kromě vnitřního přetlaku a reziduálního napětí i zatížení tlakem zeminy při zakopání trubek. Je vytvořen model trubky s trhlinou, která se šíří za daných podmínek, a vypočteny odhady životnosti.

6.1 DETAILNÍ POPIS REZIDUÁLNÍHO NAPĚTÍ

V rámci práce bylo provedeno experimentální určení obvodového reziduálního napětí a axiálního reziduálního napětí v různých trubkách. K experimentálnímu zjištění obvodového reziduálního napětí byla použita metoda rozříznutých kroužků. Tato metoda byla zvolena kvůli snadné proveditelnosti a nenáročnosti na vybavení. Experiment byl proveden nejprve na sérii 8 polypropylenových trubek různých rozměrů. Stejný experiment byl poté proveden ještě na jedné polyetylenové trubce z materiálu z kategorie PE100.



Obr. 5 – Schéma přípravy a označení vzorků pro měření deformací rozříznutých kroužků

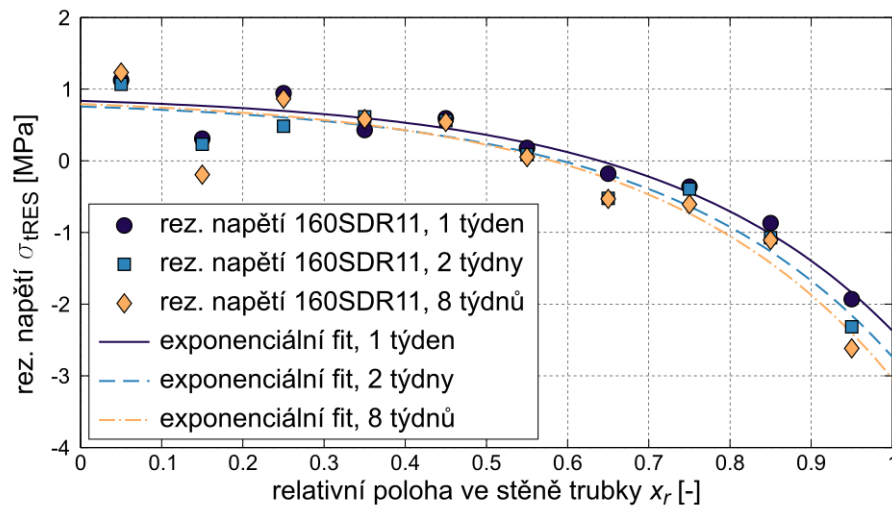
Princip provedení experimentu spočívá v rozřezání trubky na kroužky, celkem bylo potřeba 13 kroužků z každé trubky. Z vnitřního a vnějšího povrchu kroužků je odebráno několik vrstev materiálu (1–6 vrstev zevnitř, 1–6 vrstev zvenku, 1 bez odebrání,

tloušťka vrstvy je 1/10 tloušťky stěny). Ze všech kroužků je pak vyříznut segment, aby mohlo dojít k sevření kroužků. Schéma je na Obr. 5. Deformace kroužků je měřena po určité době po rozříznutí. Výpočet obvodového reziduálního napětí je založen na teorii ohybu silně zakřiveného prutu a na předpokladu, že v jednotlivých vrstvách je napětí konstantní a splňuje podmínku rovnováhy. To vede na soustavu 14 rovnic o 10 neznámých, jejímž řešením se obdrží 10 diskrétních hodnot napětí. Ty je nutné proložit křivkou – jako nejlepší se ukázala exponenciální křivka určená rovnicí ve tvaru

$$\sigma_{tRES}(x_r) = k_1 + k_2 e^{k_3 x_r} \quad (3)$$

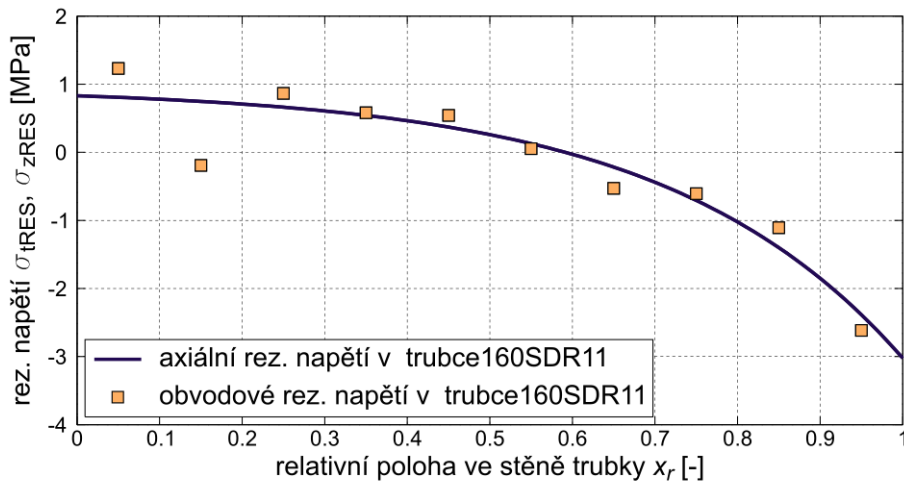
kde σ_{tRES} je obvodové reziduální napětí, k_1 , k_2 a k_3 jsou konstanty, x_r je relativní poloha ve stěně trubky. Ověření správnosti použité metodiky výpočtu bylo provedeno modelováním deformace kroužků pomocí metody konečných prvků.

Výsledky vyhodnocení experimentu pro polyetylenovou trubku 160SDR11 (tj. vnější průměr trubky 160 mm, tloušťka stěny 14,6 mm, SDR je poměr průměru ku tloušťce stěny) jsou na Obr. 6.



Obr. 6 – Výsledky výpočtu obvodového reziduálního napětí v PE trubce 160SDR11 z měření deformací kroužků po různě dlouhém čase od rozříznutí

Na zmíněné polyetylenové trubce 160SDR11 byl také proveden experiment zaměřený na určení axiálního reziduálního napětí. Byla měřena deformace vzorků ve tvaru hranolů vyříznutých v podélném směru ze stěny trubky. Výpočet průběhu axiálního reziduálního napětí nebyl vyhodnocen analyticky jako v případě obvodového reziduálního napětí. Průběh axiálního reziduálního napětí byl určen pomocí numerické simulace deformace vzorku metodou konečných prvků. Do modelu vzorku bylo zavedeno axiální reziduální napětí, jehož průběh měl charakter exponenciální rovnice ve tvaru (3). Pak byl vypočten deformovaný tvar modelu vzorku a porovnán se změřeným deformovaným tvarem. Tento postup byl zopakován v několika iteracích, než se podařilo určit takovou velikost axiálního reziduálního napětí, která by způsobila stejnou deformaci modelu, jaká byla změřena na vzorku. Průběh axiálního reziduálního napětí σ_{zRES} pro trubku 160SDR11 obdržený popsanou procedurou je téměř identický s průběhem obvodového reziduálního napětí – viz Obr. 7.



Obr. 7 – Porovnání průběhu axiálního reziduálního napětí určeného pomocí numerického modelu a hodnot obvodového reziduálního napětí získaných vyhodnocením měření na vzorcích z trubky 160SDR11

6.2 ZJEDNODUŠENÍ METODIKY URČENÍ REZIDUÁLNÍHO NAPĚTÍ

Výše popsaná metodika určení obvodového reziduálního napětí poskytuje spolehlivé výsledky, ale je náročná na přípravu, neboť je nutné z každé trubky vyrobit alespoň 13 vzorků a na soustruhu upravit tloušťku stěny u většiny z nich.

Běžný způsob, jak ušetřit čas a získat alespoň orientační velikost obvodového reziduálního napětí, je předpokládat lineární průběh obvodového reziduálního napětí po tloušťce stěny. Výhodou takového postupu je jeho jednoduchost a časová úspora, ale výsledné hodnoty jsou až příliš konzervativní. V některých případech je také výhodné mít k dispozici přesnější popis celého průběhu reziduálního napětí, nejen lineární odhad.

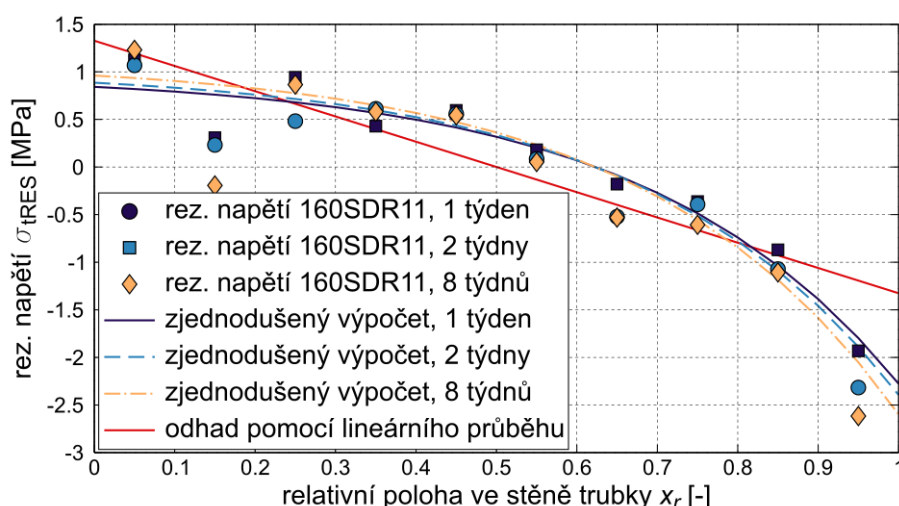
Metodika vyhodnocení měření deformací kroužků byla upravena tak, aby bylo možné vypočítat přesnější exponenciální průběh pouze z deformace jednoho nijak neupravovaného kroužku. Úprava je založena na předpokladu, že je v trubce exponenciální průběh obvodového reziduálního napětí daný rovnicí (3), ve které je konstanta $k_3 = 3,2$. Pak je možné vyjádřit konstanty k_1 a k_2 explicitně jako:

$$k_2 = \frac{\left(\frac{\Delta d}{2}\right) \cdot E_r(t) \cdot \left(\frac{d_n - s}{2} - R_n\right)}{\left[R_n - \left(\frac{\Delta d}{2}\right)\right] \cdot \left[-0,004R_n + 0,004\left(\frac{d_n}{2} - s\right) - 1,68s\right]} \quad (4)$$

$$k_1 = -\frac{k_2}{3,2} (e^{3,2} - 1) = -7,35k_2 \quad (5)$$

kde Δd je změřená změna průměru jednoho vzorku, d_n je jmenovitý vnější průměr trubky (resp. vzorku), s je tloušťka stěny, R_n je poloměr neutrální plochy a $E_r(t)$ je časově závislý relaxační modul. Popsaný zjednodušený postup určení průběhu obvodového reziduálního napětí byl aplikován na výsledky měření deformace vzorků z PE trubky 160SDR11. Srovnání výsledků s vyhodnocením předchozí detailnější metodou

je na Obr. 8 (pro porovnání vykreslen také lineární průběh vypočtený z téže deformace).



Obr. 8 – Porovnání výsledků získaných vyhodnocením experimentu na 13 kroužcích (diskrétní hodnoty) s průběhy získanými pomocí zjednodušené metodiky pro trubku 160SDR11

Zjednodušenou metodiku určení obvodového reziduálního napětí lze aplikovat na jakékoli měření deformací rozříznutých kroužků s neupravovanou tloušťkou stěny. Pro porovnání výsledných průběhů reziduálního napětí v PE trubce 160SDR11 s průběhy v jiných PE trubkách, byly zjednodušenou metodikou přepočteny výsledky publikované v pracích Pilze [32] a Franka [33]. Porovnáním těchto přepočtených výsledků s vlastními výsledky pro polyetylenovou trubku byl stanoven orientační rozsah obvodového reziduálního napětí v PE trubkách 0,8–1,6 MPa (na vnitřním povrchu).

6.3 VLIV REZIDUÁLNÍHO NAPĚTÍ NA ŽIVOTNOST

Pro ilustraci vlivu reziduálního napětí na životnost byl proveden výpočet času do porušení PE trubky 160SDR11 metodou založenou na lineárně elastické lomové mechanice. Pro tento typ výpočtu je nutná funkce popisující průběh součinitele intenzity napětí v závislosti na délce trhliny – byla použita funkce uvedená v [34], která zohledňuje vliv reziduálního napětí tím, že k vnitřnímu tlaku p_{int} je přičtena hodnota korekčního tlaku p_{res} určená podle uvažovaného reziduálního napětí na vnitřním povrchu:

$$K_I = \frac{(p_{int} + p_{res})d_n}{s} \sqrt{\pi a} \cdot Y\left(\frac{a}{s}\right) \quad (6)$$

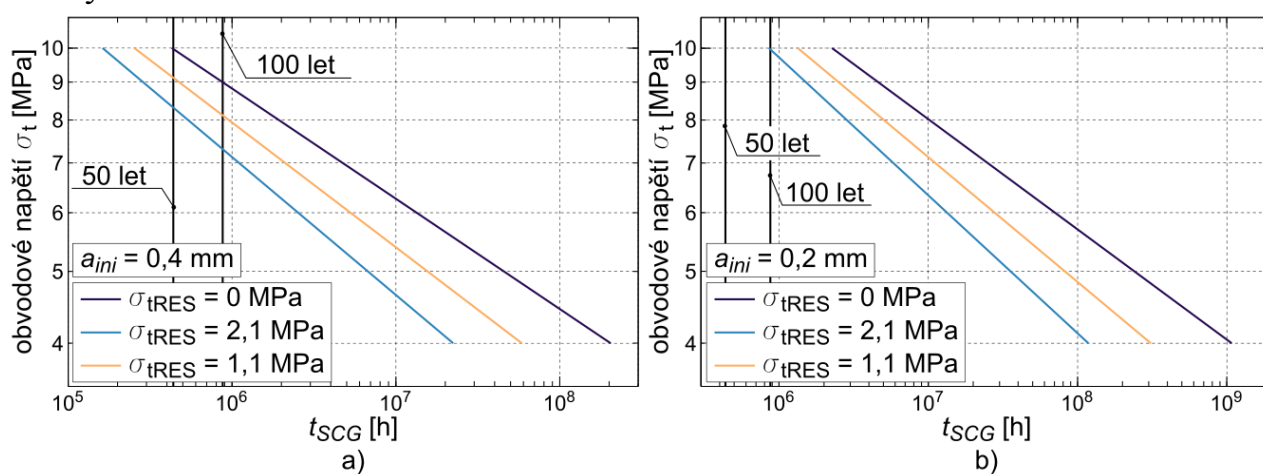
$$p_{res} = \frac{4}{3} \frac{\sigma_{tRES}}{(d_n - 2s)} \quad (7)$$

$$Y\left(\frac{a}{s}\right) = 0,3417 + 0,0588 \left(\frac{a}{s}\right) - 0,0319 \left(\frac{a}{s}\right)^2 + 0,1409 \left(\frac{a}{s}\right)^3 \quad (8)$$

kde p_{int} je vnitřní přetlak působící v trubce, d_n je nominální vnější průměr trubky, s je tloušťka stěny trubky, a je délka trhliny a $Y(a/s)$ je tvarová funkce určená pomocí metody konečných prvků

Výpočet životnosti byl proveden pro počáteční délku trhliny 0,4 mm a 0,2 mm. Byly uvažovány 3 případy reziduálního napětí – 0 MPa, 1,1 MPa a 2,1 MPa (hodnoty

byly založeny na výsledcích předchozích experimentů se zohledněním vlivu axiálního reziduálního napětí). K výpočtu byly použity materiálové konstanty $A = 7,578 \times 10^{-7}$ a $m = 6,728$, což jsou hodnoty zjištěné pomocí CRB testu pro materiál typu PE100. Vypočtené odhady životnosti, tedy časy pomalého šíření trhliny t_{SCG} , jsou v logaritmickém měřítku v grafu na Obr. 9. Přítomnost reziduálního napětí podstatně snižuje předpokládanou životnost trubky. Například pro případ 10 MPa obvodového napětí ve stěně trubky a velikosti počátečního defektu 0,4 mm se při zavedení reziduálních napětí vypočtený čas sniží z 428197 h (49 let) na 253166 h (28,9 let) při zavedení 1,1 MPa reziduálního napětí, respektive na 162092 h (18,5 let) při reziduálním napětí 2,1 MPa. Vypočtené časy jsou stále poměrně značně konzervativní, neboť zahrnují pouze vlastní šíření trhliny a nikoli čas potřebný k její iniciaci z defektu na vnitřním povrchu trubky.



Obr. 9 – Výsledky výpočtů času do porušení t_{SCG} pro různé případy velikosti reziduálního napětí a počáteční velikosti trhliny 0,4 mm (a) a 0,2 mm (b)

6.4 VLIV REZIDUÁLNÍHO NAPĚTÍ NA ŠÍŘENÍ TRHLINY V CRB VZORKU

CRB vzorky je možné použít ke stanovení odolnosti trubkového materiálu proti SCG a také k měření rychlosti šíření trhliny. V některých případech dochází ve vzorcích k asymetrickému šíření trhliny, což může mít různé příčiny. Nejvýraznější asymetrie v růstu trhliny se projevuje u CRB vzorků, které byly vyrobeny přímo ze stěny trubky a v nichž asymetrii způsobuje přítomnost reziduálního napětí.

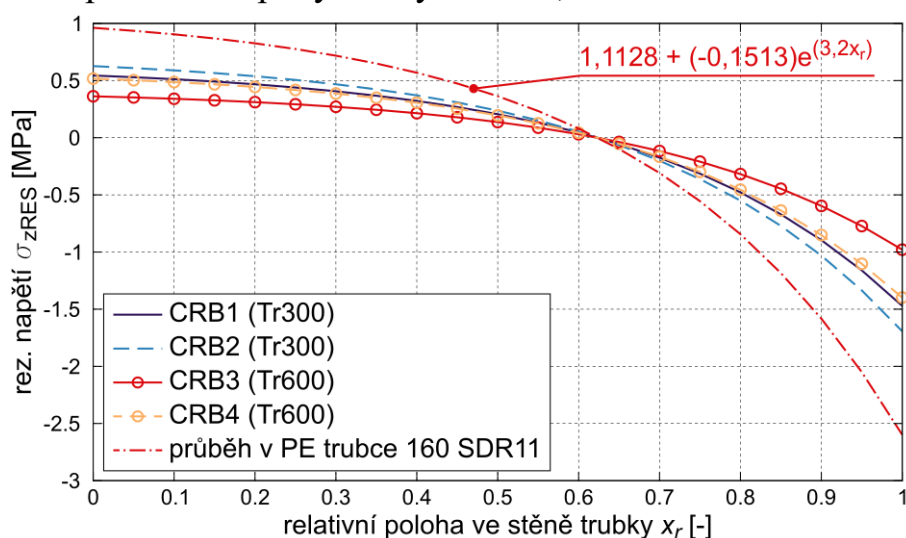
6.4.1 Reziduální napětí v CRB vzorcích

Vzorky, jejichž numerický model byl později vytvořen, byly dodány z *Polymer Competence Center Leoben* (PCCL) a stejně tak části trubek, ze kterých byly tyto vzorky vyrobeny. Před vlastní tvorbou modelu byla provedena měření za účelem určení velikosti obvodového a axiálního reziduálního napětí v těchto trubkách a vzorcích. K dispozici byly celkem 4 CRB vzorky vyrobené ze dvou trubek – 2 z trubky Tr300 extrudované rychlostí 300 kg/h a 2 z trubky Tr600 extrudované rychlostí 600 kg/h.



Obr. 10 – Fotografie CRB vzorku, který byl vyroben soustružením hranolu vyříznutého ze stěny PE trubky. Deformace je způsobena reziduálním napětím

Reziduální napětí v trubkách bylo stanoveno metodami popsány výše, a to jak obvodové, tak axiální. Obvodové reziduální napětí se pohybovalo v obou trubkách kolem hodnot 2,5 MPa na vnitřním povrchu, axiální bylo asi o 40 % nižší, takže hodnoty na vnitřním povrchu se pohybovaly okolo 1,5 MPa.



Obr. 11 – Průběhy axiálního reziduálního napětí v jednotlivých CRB vzorcích z trubek Tr300 a Tr600

Pro další modelování bylo důležité určit především axiální reziduální napětí v CRB vzorcích. Obdržené CRB vzorky vyrobené ze stěn trubek byly zdeformované, viz Obr. 10. Deformace všech 4 CRB vzorků (CRB1–CRB4) byla změřena a pomocí numerického modelu CRB vzorku byl nalezen takový průběh axiálního reziduálního napětí, který způsobuje stejnou deformaci. Průběhy axiálního reziduálního napětí vypočtené pro jednotlivé CRB vzorky jsou vykresleny v grafu na Obr. 11. Axiální reziduální napětí v CRB vzorcích je podstatně nižší než v trubkách, ze kterých byly tyto vzorky vyrobeny. Nejvyšší napětí bylo nalezeno ve vzorku CRB2. Jeho velikost činí asi 50 % axiálního napětí v příslušné trubce Tr300. Nejnižší je napětí ve vzorku CRB 3 – asi 30 % velikosti napětí v příslušné trubce Tr600. Průběhy ze vzorků CRB2 a CRB3 byly dále použity v simulacích šíření trhliny v CRB vzorku.

6.4.2 Numerický model šíření trhliny v CRB vzorku a výsledky

Byl vytvořen konečnoprvkový model CRB vzorku, zatížení bylo provedeno kombinací tahu odpovídajícím skutečnému zatížení vzorku při zkouškách a reziduálního

napětí z předchozích měření na CRB vzorcích (případy CRB2 a CRB3). Šíření trhliny ve vzorku bylo simulováno jako 10 po sobě následujících kroků, počátečním krokem byl symetrický počáteční vrub hloubky 1,5 mm. V každém kroku byly vypočteny hodnoty součinitele intenzity napětí v určených bodech pravidelně rozmístěných po 30° na čele trhliny. Vypočtené součinitele intenzity napětí byly vždy vyšší na straně s tahovým reziduálním napětím a nižší na straně s tlakovým. Přírůstek trhliny v daném kroku byl vypočten na základě hodnot součinitelů intenzity napětí v jednotlivých místech na čele trhliny.

Numerická simulace šíření trhliny byla provedena s tím, že trhlina se šíří určitou předpokládanou rychlostí v závislosti na součiniteli intenzity napětí. Tato závislost byla dána konstantami $A = 2,356 \times 10^{-5}$ a $m = 5,159$, což jsou konstanty pro materiál PE100RC při asymetrii cyklu $R = 0,1$. Z deformací vypočtených modelem bylo provedeno vyhodnocení detekované závislosti rychlosti šíření trhliny tak, jak by probíhalo u skutečného vzorku – tedy detekovaná délka trhliny byla určena z COD (otevření trhliny měřené na okraji vrubu) a součinitel intenzity napětí byl pro tuto délku trhliny vypočten pomocí vztahu určeného normou pro CRB test ISO 18489 [30]:

$$K_I(a) = \frac{F}{\pi b^2} \sqrt{\frac{\pi ab}{r}} \left(\frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{b}{r} \right) + \frac{3}{8} \left(\frac{b}{r} \right)^2 - 0,363 \left(\frac{b}{r} \right)^3 + 0,731 \left(\frac{b}{r} \right)^4 \right] \right) \quad (9)$$

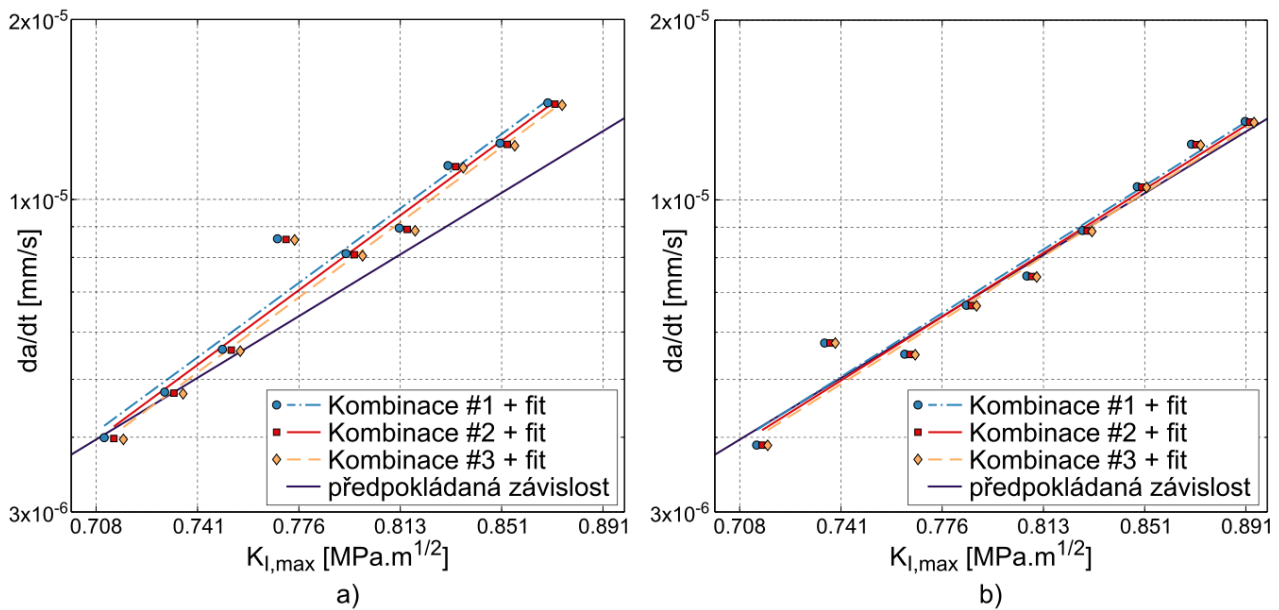
kde F je zatěžující síla, a je délka trhliny, r je poloměr vzorku, b je poloměr ligamentu vzorku ($b = r - a$).

Detekovaná délka trhliny a_{det} byla určena ze spočtených hodnot COD v jednotlivých polohách na okraji vrubu. Aby bylo možné určit detekovanou rychlost šíření trhliny, bylo potřeba určit také časové přírůstky mezi jednotlivými kroky šíření trhliny. Tyto přírůstky byly určeny integrací mocninné závislosti rychlosti šíření trhliny:

$$\Delta t = \frac{1}{A} \int_{a_1}^{a_2} \frac{1}{\left(K_{I,\theta}(a) \right)^m} da \quad (10)$$

kde Δt je časový přírůstek v sekundách mezi dvěma délkami trhlín a_1 a a_2 , $K_{I,\theta}$ je součinitel intenzity napětí v určité poloze na obvodu vzorku dané úhlem θ .

Se známými časovými přírůstky už bylo možné určit detekovanou rychlost šíření trhliny jako poměr průměrné detekované délky trhliny a časového přírůstku $\Delta a_{det}/\Delta t$. Takto vypočtená rychlost trhliny byla vykreslena v logaritmických souřadnicích v závislosti na součiniteli intenzity napětí $K_{I,max}$ vypočteném pro příslušnou délku trhliny pomocí vztahu (9). Proložení této detekované závislosti mocninnou závislostí byly určeny konstanty A_{det} a m_{det} (pro případ vyššího reziduálního napětí je $A_{det} = 3,362 \times 10^{-5}$, $m_{det} = 6,278$, pro případ nižšího pak $A_{det} = 2,465 \times 10^{-5}$, $m_{det} = 5,342$).



Obr. 12 – Detekované závislosti rychlosti šíření trhliny na součiniteli intenzity napětí vypočtené pomocí numerického modelu pro různé případy reziduálního napětí a 3 kombinace extenzometrů

Detekované závislosti rychlosti šíření trhliny pro případ vyššího reziduálního napětí CRB2 jsou na Obr.12a. Vykresleny jsou závislosti pro různé kombinace poloh extenzometrů a pro porovnání také ideální předpokládaná závislost, která by byla detekována, kdyby se trhlina šířila symetricky. Stejný graf pro případ nižšího reziduálního napětí CRB3 je na Obr. 12b. Zatímco v případě vyššího reziduálního napětí se průběhy závislosti liší výrazně, v případě nižšího reziduálního napětí se téměř shoduje s ideálním předpokládaným průběhem. Mezi závislostmi detekovanými v různých kombinacích poloh extenzometrů není výrazný rozdíl.

Pro ilustraci významnosti vlivu asymetricky rostoucí trhliny na výsledky určování rychlosti šíření trhliny byly vypočteny odhady životnosti (tj. počtu cyklů do porušení N_f) CRB vzorků. Nejprve byl proveden výpočet počtu cyklů do porušení pro případ konstant A a m popisujících závislost rychlosti šíření trhliny ve vzorcích z PE100RC uvedených výše. Poté byl tentýž výpočet proveden s konstantami A_{det} a m_{det} . Rozdíl mezi hodnotami se pohyboval do 100000 cyklů, což je běžná nepřesnost v počtech cyklů obvykle dosažených v CRB testech. To značí, že i když se trhlina v CRB vzorku šíří asymetricky, detekovaná závislost rychlosti šíření trhliny stále dostatečně charakterizuje materiál a získané konstanty mohou být použity k výpočtům odhadů životností CRB vzorků i PE trubek.

6.5 ŽIVOTNOST TRUBKY PŘI PROVOZNÍM ZATÍŽENÍ

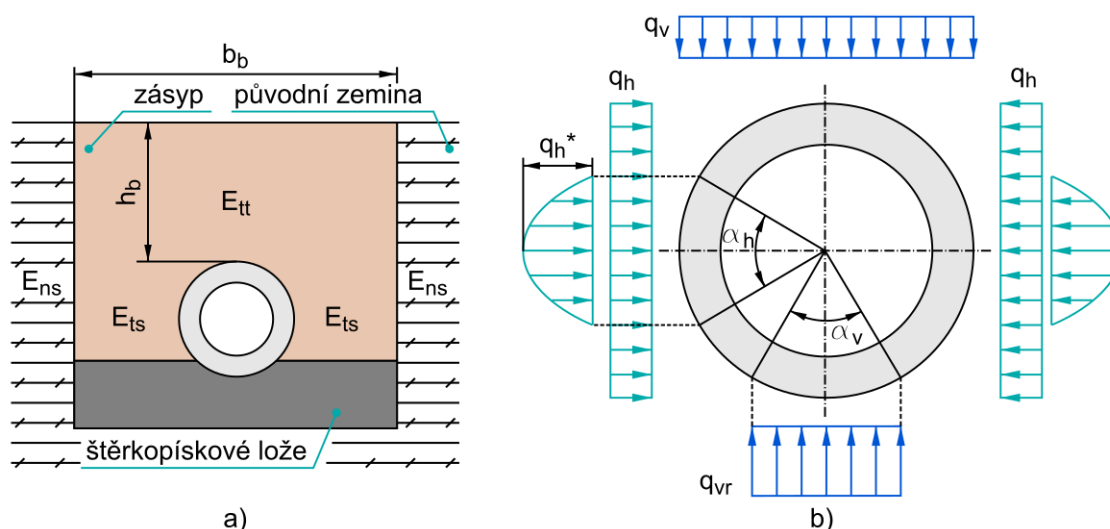
V předchozím výpočtu životnosti se zahrnutím reziduálního napětí bylo uvažováno zatížení trubky pouze vnitřním přetlakem. To jsou podmínky hydrostatické tlakové zkoušky. Za účelem splnění 4. cíle dizertační práce byl sestaven nový numerický model PE trubky 160SDR11 s trhlinou, ve kterém byla trubka zatížena kombinací zatížení zahrnující vnitřní přetlak, reziduální napětí a zatížení trubky tlakem zeminy při

zakopání. Hodnoty těchto zatížení byly založeny na skutečných velikostech zatížení, kterým může být trubka vystavena v provozu.

Výpočet byl proveden pro dva případy vnitřního přetlaku. Hodnoty vnitřního přetlaku byly zvoleny s ohledem na hodnotu tlaku, kterým mohou být zatíženy vodovodní trubky v České republice, což je 0,7 MPa. V modelu trubky byly použity hodnoty přetlaku 0,5 a 1,0 MPa.

Reziduální napětí v plastových trubkách bylo podrobně rozebráno výše. Průběh obvodového reziduálního napětí použitý v numerickém modelu trubky 160 SDR11 byl založen na průběhu zjištěném pomocí tzv. zjednodušené metodiky (tj. určení průběhu obvodového rez. napětí výpočtem z deformace jednoho kroužku, viz Obr. 8). Konkrétně byl zvolen průběh vyhodnocený z měření deformace po 8 týdnech, neboť vykazuje nejvyšší hodnoty. Tento průběh byl ještě vynásoben hodnotou korekčního faktoru 1,33 za účelem zohlednění vlivu axiálního reziduálního napětí. Průběh je určen rovnicí jako funkce relativní polohy ve stěně trubky x_r :

$$\sigma_{tRES}(x_r) = 1,48 - 0,201e^{3,2x_r} \quad (11)$$

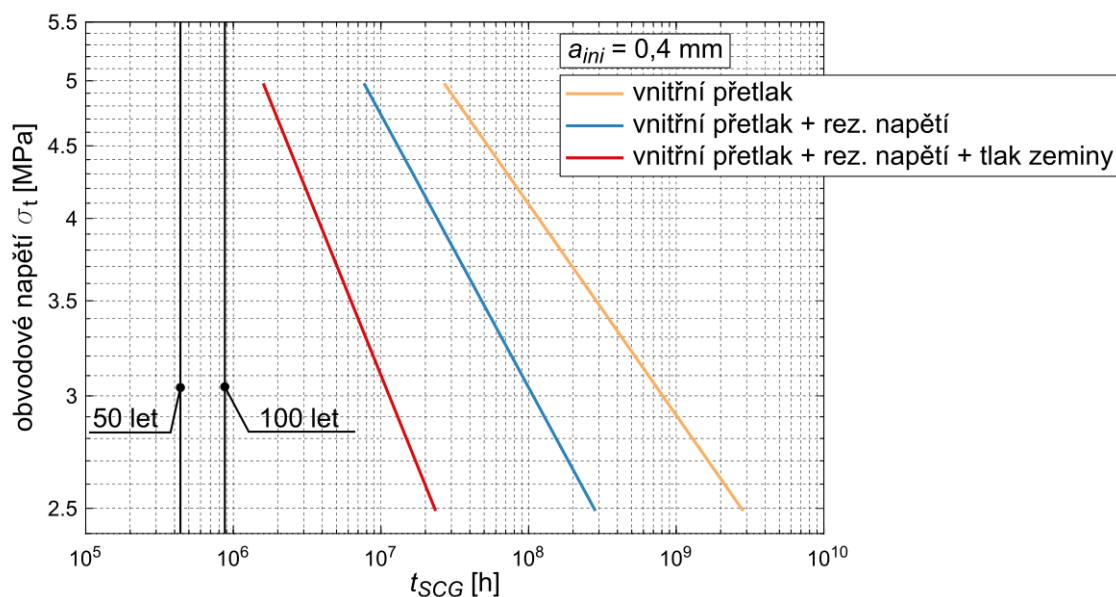


Obr. 13 – Schéma uložení trubky v zemi typu ET3b podle ÖNORM B 5012 s vyznačenými moduly zeminy (a) a schéma rozložení zatížení působícího na trubku 160 SDR11 uloženou v zemi (b)

Zatížení trubky tlakem zeminy bylo vypočteno podle rakouské normy ÖNORM B 5012 [35], která uvádí postup statického výpočtu vodovodních a kanalizačních trubek uložených v zemi. Konkrétní případ uložení trubky v zemi včetně parametrů byl zvolen na základě doporučení z PCCL, tak aby se jednalo o konzervativní případ silně zatížené trubky. Trubka je uložena do hloubky $h_b = 0,5$ m, šířka výkopu je $b_b = 1,1$ m. Je uvažováno uložení trubky pod vozovku, a tedy i přidavné zatížení od dopravy. Moduly zeminy v různých polohách vzhledem k trubce (viz Obr. 13a) byly následující: $E_{tt} = 1,423$ MPa, $E_{ts} = 1,423$ MPa, $E_{ns} = 5$ MPa. Uspořádání složek zatížení je na Obr. 13b, vypočtené hodnoty jsou $q_v = 0,1396$ MPa, $q_h = 0,0370$ MPa, $q_h^* = 0,0118$ MPa. Úhly α_h a α_v jsou oba 120° .

Pomocí numerického modelu trubky byly vypočteny hodnoty součinitele intenzity napětí pro trhlinu v trubce zatíženou pouze vnitřním přetlakem, kombinací vnitřního

přetlaku a reziduálního napětí a kombinací všech zatížení včetně tlaku zeminy (všechny případy měly variantu s vnitřním přetlakem 0,5 MPa a 1 MPa). Výpočet byl proveden pouze pro některé délky trhlin a výsledky byly proloženy polynomickými funkcemi. Závislost součinitele intenzity napětí pro případ všech tří zatížení ukazuje, že vliv tlaku zeminy je ze začátku poměrně výrazný, ale přibližně v polovině tloušťky stěny trubky se postupně vytrácí. Je to dáno tím, že obvodové napětí způsobené vnějším tlakem zeminy má ohybový charakter. Na vnitřním povrchu je kladné a směrem k vnějšímu klesá do záporných hodnot, a to dříve než reziduální napětí, čímž snižuje jeho vliv.



Obr. 14 – Porovnání časů do porušení vypočtených pomocí vztahů v literatuře a pomocí nově vytvořeného numerického modelu s různými kombinacemi zatížení

Hodnoty časů do porušení trubky jsou pro většinu uvažovaných kombinací nereálně vysoké, viz výsledky v Obr. 14. Vypočtené časy navíc stejně jako v předchozích výpočtech nezahrnují čas potřebný k iniciaci trhliny. Takto vysoké hodnoty znamenají, že při daném zatížení trubky spolehlivě překročí požadovanou životnost 50 let, případně i 100 let a k porušení trubek dojde jiným mechanismem než SCG. Po dlouhé době provozu trubky totiž začne docházet k degradaci materiálu, což není v uvedených výpočtech nijak zohledněno. Zatížení zeminou posouvá vypočtenou životnost trubky blíže k reálným hodnotám a ukazuje se, že může v určitých hraničních případech mít podstatný vliv na životnost. Je však nutno zdůraznit, že použitý případ je skutečně výrazně konzervativní kvůli kombinaci zatížení dopravou a mělkého výkopu.

7 ZÁVĚR

Dizertační práce se zabývá především reziduálním napětím v polyolefinových tlakových trubkách, jako faktorem, který je nutné zahrnout do odhadu jejich životnosti. Práce je ale pojata širěji a řeší i vliv reziduálního napětí na vyhodnocení měření rychlosti šíření trhliny v trubkových materiálech, nebo provozní zatížení trubek včetně

zatížení od zeminy a provozu na vozovce na povrchu. Práce tedy postihuje různé jevy a problémy, které se objevují v souvislosti s odhadem dlouhodobé životnosti polymerních trubek na základě předpokladu, že porušení probíhá mechanismem pomalého šíření creepové trhliny.

V práci bylo definováno 5 základních cílů, které mají být splněny. Závěry pro jednotlivé cíle jsou uvedeny v následujícím přehledu.

1. Detailní popis reziduálního napětí ve stěně polymerní trubky

V rámci dizertační práce byly provedeny a vyhodnoceny experimenty s cílem určit průběh reziduálního napětí, obvodového a axiálního, ve stěnách různých polymerních trubek.

Obvodové reziduální napětí je obvykle z hlediska vlivu na porušení stěny trubky důležitější, proto byla jeho určení věnována větší pozornost. Pro podrobné stanovení průběhu a velikosti tohoto napětí byla zvolena metoda rozříznutých kroužků, při které se měří deformace kroužků vyrobených ze stěny trubky. Postup výpočtu průběhu napětí ze změřené deformace byl založen na teorii ohybu silně zakřivených prutů. Výsledky pak byly ověřeny numerickou simulací experimentu, která byla v dobré shodě s experimentálními daty. Ukázalo se, že průběh obvodového napětí nejlépe popisuje exponenciální křivka. Experiment metodou rozříznutých kroužků byl proveden na sadě 8 polypropylenových trubek různých rozměrů a jedné polyetylenové trubce typu 160 SDR11. Průběhy v jednotlivých PP trubkách se vzájemně příliš nelišily. Pro účely dalšího porovnávání byl stanoven průměrný průběh v PP trubkách, který je charakterizován hodnotou 1,3 MPa na vnitřním povrchu trubky a -3,6 MPa na vnějším. V PE trubce pak byly hodnoty zjištěného průběhu přibližně dvakrát menší, průběh však měl podobný tvar.

Axiální reziduální napětí bylo určeno pouze v PE trubce 160 SDR11, a to pomocí měření deformace pásků vyříznutých v podélném směru ze stěny trubky. Průběh reziduálního napětí způsobující danou deformaci byl nalezen pomocí metody konečných prvků. Tento průběh byl téměř stejný jako průběh obvodového napětí v téže trubce.

2. Zjednodušení metodiky určování reziduálního napětí

Protože postup stanovení reziduálních napětí pomocí odběru velkého množství kroužků s modifikovanou tloušťkou stěny je velice náročný na provedení, byla vytvořena zjednodušená metoda, která umožňuje získat realistický odhad reziduálních napětí pomocí rozříznutí a měření deformace pouze jednoho kroužku. Tato metoda vychází z předpokladu exponenciálního průběhu reziduálního napětí, který je založen na předchozích experimentech, a modifikuje tak zjednodušenou metodu popsanou v literatuře, která předpokládá lineární průběh reziduálního napětí. Tento postup umožňuje vyhodnotit i data již změřená a vyhodnocená pomocí běžných metod a výsledky pak použít ve výpočtech zbytkové životnosti.

3. Kvantifikace vlivu reziduálního napětí na životnost trubky

Pomocí předchozích experimentů a výpočtů byl určen rozsah hodnot reziduálního napětí ve sledovaných polymerních trubkách (1,1–2,1 MPa), který byl dále použit ve výpočtu odhadu životnosti trubky s uvažováním reziduálního napětí. Výpočet byl proveden integrací modifikované Paris-Erdoganovy rovnice. Byla použita závislost součinitele intenzity napětí na délce trhliny s vlivem reziduálního napětí publikovaná autory z ÚFM. Výsledné hodnoty ukázaly, že reziduální napětí má podstatný vliv na životnost trubky, vypočtený čas do porušení s uvažováním reziduálního napětí je o 40–60 % nižší než v případě bez reziduálního napětí.

Velikost reziduálního napětí lze tedy poměrně spolehlivě odhadnout výše uvedenými metodami pro konkrétní případy trubek a potom ji jednoduše zahrnout do výpočtu životnosti.

4. Stanovení vlivu provozních zatížení na životnost trubky

Případ provozního zatížení působícího na běžně používanou zakopanou vodovodní trubku byl v této práci stanoven na základě běžných hodnot vnitřních přetlaků v trubkách v ČR, reziduálního napětí z předchozích experimentů a vypočteného zatížení zeminou při zakopání trubky. Zatížení zeminou bylo stanoveno na základě rakouské normy ÖNORM B 5012. Konkrétní parametry charakterizující provedení výkopu a vlastnosti zeminy byly odhadnuty ve spolupráci s PCCL. Aby bylo možné provést výpočet životnosti, bylo nutné nejprve pomocí numerické simulace šíření trhliny stanovit závislost součinitele intenzity napětí pro danou kombinaci zatížení.

Životnosti vyšly i pro kombinaci všech tří zatížení poměrně vysoké, což bylo dáno především uvažováním nízkého vnitřního přetlaku. Přestože jak reziduální napětí, tak zatížení od zeminy mají na vypočtenou životnost podstatný vliv, vnitřní přetlak je určující. Trubky z PE100 (jehož materiálové charakteristiky byly při výpočtu použity) jsou dimenzovány tak, aby měly životnost alespoň 50 let při obvodovém napětí 10 MPa (což při rozměrech trubky 160 SDR11 odpovídá zhruba vnitřnímu přetlaku 2 MPa). Vysoké vypočtené hodnoty odhadů životnosti tedy znamenají, že trubka by při běžném provozu měla 50 let bezpečně překročit. Na její skutečnou životnost pak bude mít vliv především degradace materiálu daná mimo jiné i vlastnostmi přepravovaného média. Zahrnutí reziduálního napětí a tlaku zeminy jsou nicméně důležité faktory, se kterými je nutné při odhadu životnosti počítat a které podobné výpočty přibližují realitě.

Metodu zohlednění zatížení tlakem zeminy lze, kromě tlakových trubek, použít také na trubky netlakové, pro které může být tento typ zatížení významnější.

5. Posouzení vlivu reziduálního napětí na výsledky zrychlených zkoušek polymerních materiálů

Práce se také zabývala jevem, který se objevuje při testování trubkových materiálů pomocí CRB testu. U válcových vzorků s obvodovým počátečním vrubem, které se v tomto typu testu používají, se může vyskytnout asymetrické šíření trhliny. Tento jev může mít více příčin, z nichž jedním je i asymetrie v zatížení vzorku způsobená

reziduálním napětím, které ve vzorku zůstane, je-li vzorek vyroben přímo ze stěny trubky. Byl studován vliv takto způsobené asymetrie na výsledky měření rychlosti šíření trhliny v CRB vzorku, což je důležité, neboť výsledky tohoto typu měření se používají právě ve výpočtech životnosti.

Byl sestaven model CRB vzorku s trhlinou zatíženého kombinací tahu a asymetrického reziduálního napětí. Model byl vyhodnocen stejně jako skutečný vzorek v experimentu a byl sledován rozdíl mezi předpokládanou rychlostí šíření trhliny a detekovanou rychlostí. Tento rozdíl je právě dán asymetrickým šířením trhliny. Detekovaná rychlost šíření trhliny je sice ovlivněna asymetrickým šířením, avšak nepřesnost v určených materiálových parametrech nezpůsobí významnou chybu v odhadu životnosti.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NAYYAR, M., R. KING a S. CROCKER. *Piping handbook*. 7. New York: McGraw-Hill, 2000. ISBN 0-07-047106-1.
- [2] PLASTICS PIPE INSTITUTE INC. *Handbook of polyethylene pipe* [online]. 2012. Dostupné z: http://plasticpipe.org/publications/pe_handbook.html
- [3] BRÖMSTRUP, H. *PE 100 pipe systems*. 3. vyd. Essen: Vulkan-Verlag, 2009. ISBN 978-3-8027-2759-7.
- [4] ISO 1167-1: *Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids – Determination of the resistance to internal pressure - Part 1: General method*. 2006
- [5] ISO 9080: *Plastics piping and ducting systems - Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation*. 2012
- [6] HUTAŘ, P., M. ŠEVČÍK, L. NÁHLÍK, G. PINTER, A. FRANK a I. MITEV. A numerical methodology for lifetime estimation of HDPE pressure pipes. *Engineering Fracture Mechanics*. 2011, 78(17), 3049–3058. ISSN 0013-7944. doi:10.1016/j.engfracmech.2011.09.001
- [7] JANSON, L.-E. *Plastics pipes for water supply and sewage disposal*. 3. vyd. Stockholm: Borealis, 1999.
- [8] CHUDNOVSKY, A., Z. ZHOU, H. ZHANG a K. SEHANOBISH. Lifetime assessment of engineering thermoplastics. *International Journal of Engineering Science*. 2012, 59, 108–139. ISSN 0020-7225. doi:10.1016/j.ijengsci.2012.03.016
- [9] ANDENA, L., M. RINK, R. FRASSINE a R. CORRIERI. A fracture mechanics approach for the prediction of the failure time of polybutene pipes. *Engineering Fracture Mechanics*. 2009, 76(18), 2666–2677. ISSN 0013-7944. doi:10.1016/j.engfracmech.2009.10.002
- [10] HOÀNG, E. M. a D. LOWE. Lifetime prediction of a blue PE100 water pipe. *Polymer Degradation and Stability*. 2008, 93(8), 1496–1503. ISSN 0141-3910. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2008.05.008
- [11] KRISHNASWAMY, R. K. Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high-density polyethylene (HDPE) pipes. *Polymer*. 2005, 46(25), 11664–11672. ISSN 0032-3861. doi:10.1016/j.polymer.2005.09.084
- [12] GRELLMANN, W. a B. LANGER. *Deformation and Fracture Behaviour of Polymer Materials*. Cham: Springer International Publishing, 2017. Springer Series in Materials Science. ISBN 978-3-319-41877-3. doi:10.1007/978-3-319-41879-7
- [13] FRANK, A., W. FREIMANN, G. PINTER a R. W. LANG. A fracture mechanics concept for the accelerated characterization of creep crack growth in PE-HD pipe grades. *Engineering Fracture Mechanics*. 2009, 76(18), 2780–2787. ISSN 00137944. doi:10.1016/j.engfracmech.2009.06.009
- [14] DEBLIECK, R., D. VAN BEEK, K. REMERIE a I. M. WARD. Failure mechanisms in polyolefines: The role of crazing, shear yielding and the

- entanglement network. *Polymer*. 2011, 52(14), 2979–2990. ISSN 0032-3861. doi:10.1016/j.polymer.2011.03.055
- [15] POKLUDA, J., F. KROUPA a L. OBDRŽÁLEK. *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek*. Brno: PC-DIR spol. s r.o., 1994. ISBN 80-214-0575-9.
- [16] OCONNELL, P. A., M. J. BONNER, R. A. DUCKETT a I. M. WARD. The Relationship between Slow Crack-Propagation and Tensile Creep-Behavior in Polyethylene. *Polymer*. 1995, 36(12), 2355–2362. ISSN 0032-3861. doi:10.1016/0032-3861(95)97333-B
- [17] CHUDNOVSKY, A. a Y. SHULKIN. Application of the crack layer theory to modeling of slow crack growth in polyethylene. *International Journal of Fracture*. 1999, 97, 83–102. ISSN 0376-9429. Dostupné z: doi:10.1023/A:1018683624720
- [18] ROSE, L. J., A. D. CHANNELL, C. J. FRYE a G. CAPACCIO. Slow crack growth in polyethylene: A novel predictive model based on the creep of craze fibrils. *Journal of Applied Polymer Science*. 1994, 54(13), 2119–2124. ISSN 1097-4628. doi:10.1002/app.1994.070541314
- [19] KRAMER, E. J. Microscopic and molecular fundamentals of crazing. KAUSCH, H. H., ed. *Crazing in Polymers*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1983, s. 1-56. *Advances in Polymer Science*. doi: 10.1007/BFb0024055.
- [20] GILES, H. F., J. R. WAGNER a E. M. MOUNT. *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. Norwich: William Andrew Inc., 2005. ISBN 0-8155-1473-5.
- [21] WILLIAMS, J. G., J. M. HODGKINSON a A. GRAY. The determination of residual stresses in plastic pipe and their role in fracture. *Polymer Engineering and Science*. 1981, 21(13), 822–828. ISSN 0032-3888. doi:10.1002/pen.760211304
- [22] CHOI, S. a L. J. BROUTMAN. Residual Stresses in Plastic Pipes and Fittings I. Methods for Experimental Analysis. *Polymer*. 1997, 21(1), 71–82.
- [23] GUAN, Z. W. a J. C. BOOT. A method to predict triaxial residual stresses in plastic pipes. *Polymer Engineering and Science*. 2004, 44(10), 1828–1838. ISSN 0032-3888. doi:10.1002/pen.20184
- [24] CHOOLLUN, V. K., D. C. WIJEYESEKERA, R. POTTER a J. W. WALSH. Photoelastic Method Revisited For Residual Stress Measurement In High Density Polyethylene Pipes. *Proceedings of the AC&T*. 2009, 86–94.
- [25] DENTON, A. A. a J. M. ALEXANDER. On the Determination of Residual Stresses in Tubes. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 1963, 5(1), 75–88. ISSN 0022-2542. doi:10.1243/JMES_JOUR_1963_005_011_02
- [26] CLUTTON, E. Q. a J. G. WILLIAMS. On the measurement of residual stress in plastic pipes. *Polymer Engineering and Science*. 1995, 35(17), 1381–1386. ISSN 0032-3888. doi:10.1002/pen.760351709
- [27] BOOT, J. C., Z. W. GUAN a I. TOROPOVA. Structural performance of thin-walled polyethylene pipe linings for the renovation of water mains. *Tunnelling*

- and Underground Space Technology*. 1996, 11(1), 37–51. ISSN 0886-7798. doi:10.1016/0886-7798(95)00038-0
- [28] ANDERSON, T. L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. 3. vyd. Boca Raton: Taylor&Francis Group, 2006. ISBN 978-1-4200-5821-5.
- [29] FRANK, A., F. ARBEITER, I. BERGER, P. HUTAŘ, L. NÁHLÍK a G. PINTER. Fracture Mechanics Lifetime Prediction of Polyethylene Pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2019, 10(1), 1–14. doi:10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000356.
- [30] ISO 18489: *Polyethylene (PE) materials for piping systems - Determination of resistance to slow crack growth under cyclic loading - Cracked Round Bar test method*. 2015
- [31] PINTER, G., R. W. LANG a M. HAAGER. A Test Concept for Lifetime Prediction of Polyethylene Pressure Pipes. *Monatshefte für Chemie – Chemical Monthly*. 2007, 138(4), 347–355. ISSN 0026-9247. doi:10.1007/s00706-007-0618-1
- [32] PILZ, G. *Viskoelastische Eigenschaften polymerer Werkstoffe für Rohranwendungen*. Dissertation. Montanuniversität Leoben. 2001.
- [33] FRANK, A., G. PINTER a R. W. LANG. Prediction of the remaining lifetime of polyethylene pipes after up to 30 years in use. *Polymer Testing*. 2009, 28(7), 737–745. ISSN 0142-9418. doi:10.1016/j.polymertesting.2009.06.004
- [34] HUTAŘ, P., M. ŠEVČÍK, A. FRANK, L. NÁHLÍK, J. KUČERA a G. PINTER. The effect of residual stress on polymer pipe lifetime. *Engineering Fracture Mechanics*. 2013, 108, 98–108. ISSN 0013-7944. doi:10.1016/j.engfracmech.2013.04.014
- [35] ÖNORM B 5012: *Statische Berechnung erdverlegter Rohrleitungen für die Wasserversorgung und die Abwasser-Entsorgung*. 2008

9 CURRICULUM VITAE

Jan Poduška

nar. 1988 v Pacově

poduska@ipm.cz



Vzdělání

2014–dosud *Doktorské studium* – Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, obor *Inženýrská mechanika*
Téma dizertační práce: *Vliv reziduálních napětí na odhad životnosti polymerních trubek*

2011–2014 *Magisterské studium* – Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, obor *Inženýrská mechanika a biomechanika*
Téma diplomové práce: *Popis reziduálních napětí v polymerních trubkách*

2008–2011 *Bakalářské studium* – Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, obor *Strojní inženýrství*
Téma bakalářské práce: *Experimentální analýza dynamického chování vetknutého nosníku*

Pracovní zkušenosti

2014–dosud *Ústav fyziky materiálů, AV ČR, Brno* – juniorský výzkumný pracovník ve Skupině vysokocyklové únavy, zaměření na lomové chování polymerů, reziduální napětí v plastových trubkách a životnost trubek, zkoušky polymerních materiálů, výpočty metodou konečných prvků

Pedagogická činnost

2014–2016 vedení cvičení předmětu *Pružnost a pevnost 2* v bakalářském studijním programu na FSI VUT v Brně

2015 vedení bakalářské práce *Vliv geometrie vzorku na úroveň zavíracího napětí před čelem únavové trhliny*, autor Marek Šebík

10 ABSTRACT

The lifetime of plastic pipes for water supply and other applications is demanded to exceed at least 50 years. Such a long lifetime is difficult to prove by standard testing methods like the hydrostatic pressure test. However, it is possible to calculate an estimation of the lifetime, as the most frequently occurring mechanism of failure of plastic pipes is the creep crack propagation and subsequent failure. The method is based on describing the crack propagation by parameters of the linear-elastic fracture mechanics. An important part of this method is a finite element simulation of crack propagation in a pipe loaded by various types of loads. Residual stress, a side product of solidification after extrusion, is one of these loads. This thesis begins with an introductory part and literature review of the relevant topics – most of all the typical material properties of the pipe materials, mechanisms of failure, methods of residual stress determination suitable for plastic pipes and their results, methods of testing the materials and calculating lifetime. After the introduction, the problems to be solved are defined. The description of the residual stress state in the wall of various plastic pipes is the main topic. Both tangential (hoop) and axial residual stress in pipes of different dimensions and materials are determined using a combination of experiments and numerical simulations. Also, a simplified method of tangential residual stress is designed that can provide a sufficiently precise description of the tangential residual stress state and is not difficult to carry out. A method to include the residual stress in the lifetime calculations and its influence on the lifetime is also dealt with. Apart from residual stress, the influence of soil loads in case of a buried pipe is studied. The residual stress can also influence the experimental determination of crack growth rate. If the CRB (cracked round bar) test is used to measure the crack growth rate, the crack can propagate asymmetrically due to the presence of residual stress in the specimens, which affects the results. Based on a finite element simulation of crack propagation in a CRB specimen, the severity of the influence is assessed.