



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## POPIS ŠÍŘENÍ CREEPOVÉ TRHLINY V ELEKTROTVAROVKÁCH PRO SPOJOVÁNÍ POLYMERNÍCH TRUBEK

DESCRIPTION OF CREEP CRACK PROPAGATION IN ELECTROFUSION SOCKETS FOR POLYMER PIPES  
CONNECTION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

#### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petra Helešicová

#### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Trávníček

BRNO 2021

# Zadaní bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Studentka:	<b>Petra Helešicová</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Lukáš Trávníček</b>
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Popis šíření creepové trhliny v elektrotvarovkách pro spojování polymerních trubek**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Elektrotvarovky se používají k rychlému a jednoduchému spojování plastových potrubí. Z hlediska dlouhodobé životnosti plastových trubek a tvarovek je důležité, aby byly odolné proti šíření trhliny mechanismem tzv. „pomalého šíření creepové trhliny“. Tento mechanismus lze při určitém zjednodušení popsat pomocí parametrů lineární elastické lomové mechaniky a provést i odhad životnosti. Hlavními cíli práce bude popsat lomové chování spoje elektrotvarovky a trubek pomocí součinitele intenzity napětí a určit vliv změny geometrických parametrů elektrotvarovky na součinitel intenzity napětí. Nezbytné numerické analýzy budou provedeny metodou konečných prvků v softwaru ANSYS. Práce bude vypracována ve spolupráci s Ústavem fyziky materiálů AV ČR, v. v. i..

### **Cíle bakalářské práce:**

- 1) Literární rešerše zaměřená na poškozování polymerních trubek
- 2) Vytvoření numerického modelu typického spoje elektrotvarovky a tlakových trubek.
- 3) Určení závislosti součinitele intenzity napětí na délce trhliny pro základní konfiguraci elektrotvarovky.
- 4) Určení vlivu geometrických parametrů elektrotvarovky na součinitel intenzity napětí.

### **Seznam doporučené literatury:**

ANDERSON, Ted L. Fracture mechanics: fundamentals and applications. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, c2005. ISBN 978-0849316562.

HUTAŘ, Pavel, ŠEVČÍK, Martin, NÁHLÍK, Luboš, PINTER, Gerald, FRANK, Andreas a MITEV, Ivaylo. A numerical methodology for lifetime estimation of HDPE pressure pipes. Engineering Fracture Mechanics. 2011, 78(17), 3049-3058. ISSN 00137944.

FRANK, Andreas, BERGER, Isabelle a PINTER, Gerald. Comparison of real and simulated failure times of electrofusion sockets made of polyethylene. Join. Plast. 11 (2017) 158–164.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Prezentovaná bakalářská práce je zaměřena na popis šíření trhliny mechanismem pomalého šíření v elektrotvarovkách, které se využívají pro spojování polymerních trubek. Práci lze rozdělit do několika částí. První částí je rešerše zaměřená na polymerní trubky, jejich materiály, typy porušování a metody spojování včetně detailního popisu procesu svařování s využitím elektrotvarovek. Další část je věnována oblasti lomové mechaniky, využití pro řešení praktické části práce. Blíže je popsána lineárně elastická lomová mechanika a napěťový přístup k popisu tělesa s trhlinou. Představeny jsou metody zjišťování velikosti součinitele intenzity napětí, který je hlavním parametrem pro popis napjatosti na čele trhliny. Praktická část práce je zaměřena na modelování šíření trhliny ve stěně elektrotvarovky a výpočet součinitele intenzity napětí v závislosti na délce trhliny. Je popsáno vytvoření numerického modelu a proces výpočtu simulujícího šíření trhliny. Směr šíření je stanoven pomocí kritéria MTS. Pro vytvoření modelu a simulaci je použito makro v jazyce APDL. Hlavním cílem práce je určení vlivu změny geometrie elektrotvarovky nebo pracovní konfigurace na hodnoty součinitele intenzity napětí. Závislosti součinitele intenzity napětí pro modifikované modely jsou porovnávány s původní konfigurací. Na závěr jsou vypočteny odhady životnosti elektrotvarovek s využitím vypočtených závislostí součinitele intenzity napětí.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

polymerní trubky, šíření trhliny, elektrofúzní svařování, elektrotvarovka, součinitel intenzity napětí, metoda konečných prvků, odhad životnosti

## **ABSTRACT**

The presented bachelor's thesis deals with crack propagation by the slow crack growth mechanism in electrofusion sockets used for welding of polymer pipes. The thesis can be divided into several parts. First part presents a research on the topic of polymer pipes, materials used for their production, types of failures and ways of connecting including detailed description of the process of electrofusion welding with electrofusion sockets. Next part is focused on fracture mechanics that is used for the practical part of the thesis. The theory of linear elastic fracture mechanics and its stress-intensity approach are described. Different ways of obtaining the stress intensity factor, which is the main parameter used to describe the stress distribution at the crack tip, are presented. The practical part of the thesis focuses on numerical modelling of crack propagation through an electrofusion socket wall and calculating values of stress intensity factor in dependence on the crack length. The creation of the numerical model for the crack propagation simulation is described. The direction of propagation is evaluated using MTS criterion. The whole simulation is carried out by a parametric macro created using the APDL language. The main goal of the thesis is to describe the influence of the socket geometry or joint configuration changes on the stress intensity factor values and calculated lifetimes. The stress intensity factor functions for the modified configurations are compared to the original. At the end of the thesis, lifetime estimations of the electrofusion sockets are also calculated using the stress intensity factor functions and compared.

## **KEYWORDS**

polymer pipes, crack propagation, electrofusion welding, electrofusion socket, stress intensity factor, finite element method, lifetime estimation

HELEŠICOVÁ, Petra. *Popis šíření creepové trhliny v elektrotvarovkách pro spojování polymerních trubek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2021, 60 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132475>. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Trávníček

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Petra Helešicová  
**VUT ID autora:** 208605  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2020/21  
**Téma závěrečné práce:** Popis šíření creepové trhliny v elektrotva-  
rovkách pro spojování polymerních tru-  
bek

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....  
podpis autorky\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat svým učitelům, kteří mě vždy podporovali ve studiu, svým přátelům, kteří se mnou studium prožívají, a své rodině, která je mi oporou každým dnem. Zároveň bych chtěla poděkovat všem zaměstnancům Ústavu fyziky materiálů AV ČR, kteří mi poskytovali cennou zpětnou vazbu. Práce vznikla ve spolupráci s Polymer Competence Center Leoben v rámci projektu COMET K1. V neposlední řadě bych chtěla velmi poděkovat svému vedoucímu, který mi byl nedocenitelnou podporou při psaní této práce a poskytoval mi odborné vedení s věcnými poznámkami a ochotou při konzultacích.

# Obsah

Úvod	10
<b>1 Polymerní trubky</b>	<b>11</b>
1.1 Využití polymerních trubek . . . . .	11
1.2 Materiály polymerních trubek . . . . .	11
1.2.1 Mechanické vlastnosti polymerů . . . . .	12
1.3 Typy porušování polymerních trubek . . . . .	13
1.4 Testování životnosti polymerních trubek . . . . .	17
1.5 Spojování polymerních trubek . . . . .	20
1.5.1 Rozpouštědlové lepení plastů . . . . .	21
1.5.2 Šroubové spoje . . . . .	21
1.5.3 Polyfúzní svařování . . . . .	21
1.5.4 Svařování na tupo . . . . .	22
1.5.5 Elektrofúzní svařování . . . . .	23
<b>2 Lomová mechanika</b>	<b>28</b>
2.1 Lineárně elastická lomová mechanika – LELM . . . . .	28
2.1.1 Součinitel intenzity napětí . . . . .	29
2.1.2 Trajektorie šíření trhliny . . . . .	32
2.2 Životnost . . . . .	33
<b>3 Charakteristika řešeného problému a cíle práce</b>	<b>35</b>
<b>4 Realizace řešení</b>	<b>36</b>
4.1 Model geometrie . . . . .	36
4.2 Model materiálu . . . . .	37
4.3 Model diskretizace . . . . .	38
4.4 Model zatížení a okrajových podmínek . . . . .	39
4.5 Postup výpočtu . . . . .	40
4.6 Kvalita sítě a její vliv na hodnoty součinitele intenzity napětí . . . . .	42
<b>5 Analýza výsledků</b>	<b>44</b>
5.1 Závislost součinitele intenzity napětí na délce trhliny . . . . .	44
5.2 Trajektorie trhliny . . . . .	46
5.3 Životnost . . . . .	47
<b>Závěr</b>	<b>50</b>
<b>Literatura</b>	<b>51</b>
<b>Seznam symbolů a zkratek</b>	<b>57</b>



Seznam obrázků	59
Seznam tabulek	60
Seznam příloh	60

# Úvod

Polymery se během posledních padesáti let staly jednou z nejvyužívanějších skupin materiálů. Pro svou širokou škálu využití jsou v dnešní době používány téměř v každém průmyslovém odvětví, kde v některých aplikacích postupně nahrazují klasicky používané kovové materiály [23]. Tuto skutečnost lze pozorovat například u potrubních systémů.

Potrubní systémy z polymerů disponují několika přednostmi oproti jejich kovovým předchůdcům. Jedná se například o nízkou hmotnost, jednoduchou výrobu, skladování a přepravu a odolnost vůči korozi a vnějším faktorům (např. UV záření) [23, 62]. Potrubí, která jsou převážně vyráběná z termoplastických materiálů, lze snadno spojovat jejich natavením. Díky jednoduchému použití a technické nenáročnosti je jedním z nejpoužívanějších způsobů spojování svařování s využitím elektrotvarovek s odporovým drátem, který způsobuje nahřátí materiálu a jeho svaření [3]. Při výrobě, skladování, přepravě nebo spojování jednotlivých segmentů potrubí ale mohou vznikat defekty, které působí jako koncentrátoři napětí. Při přepravě stlačeného média (nejčastěji vody nebo zemního plynu) je stěna potrubí zatížena vnitřním tlakem, který v místech defektů způsobuje iniciaci trhlin. Tyto trhliny se během provozu šíří stěnou trubky mechanismem pomalého šíření, až dojde k jejímu porušení a ztrátě těsnosti [52, 24].

Pro popis tohoto šíření je využíváno lomové mechaniky, disciplíny zabývající se tělesem s trhlinou [1, 60]. Přestože polymerní materiály obecně vykazují viskoelastické chování, lze díky poměrně malým provozním zatížením splnit platnosti lineárně elastické lomové mechaniky. Jedním z možných přístupů LELM je napěťový přístup, jehož základním parametrem je součinitel intenzity napětí  $K$ . Tento parametr přesně popisuje napjatost v okolí čela trhliny a je závislý na působícím napětí, délce trhliny a tvaru tělesa. Součinitel intenzity napětí lze určovat analyticky, experimentálně, pomocí inženýrských metod, nebo čím dál využívanějších numerických metod. Jelikož  $K$  popisuje napjatost v okolí čela trhliny, lze s jeho využitím predikovat také směr jejího šíření.

Pro testování trubek byly vytvořeny zkoušky měření životnosti trubky (Hydrostatická zkouška ČSN EN ISO 1167-1 [4]) nebo odolnosti materiálu proti šíření trhliny mechanismem pomalého šíření (např. PENT test [40, 33], FNCT [51, 43], CRB test [15]). Druhý typ zkoušek byl zaveden pro získání výsledků během kratšího času, neboť doba hydrostatické zkoušky může dosahovat i tisíců hodin. Tyto zkoušky však nedokáží predikovat životnost trubky kvantitativně.

Odhad životnosti, tedy doby, za kterou trhlina naroste o určitou délku, lze provést s využitím modifikované Paris–Erdoganovy rovnice [21]. Ta využívá hodnot součinitele napětí a materiálových parametrů popisujících rychlost šíření trhliny v materiálu. Tyto hodnoty jsou získávány z laboratorních zkoušek (např. CRB test).

Tato bakalářská práce se zabývá numerickým modelováním šíření trhliny ve stěně elektrotvarovky, při kterém jsou vypočítány hodnoty součinitele intenzity napětí v závislosti na délce trhliny. Zkoumán je také vliv geometrie a pracovní konfigurace na velikost tohoto součinitele. Následně je odhadnuta životnost uvažovaných modelů pomocí modifikované Paris–Erdoganovy rovnice.

# 1 Polymerní trubky

V této kapitole jsou detailně popsány polymerní trubky, jejich rozdělení podle materiálů použitých pro výrobu, typy a mechanismy jejich porušování a testování životnosti. Dále se tato kapitola také zaměřuje na metody spojování polymerních trubek.

## 1.1 Využití polymerních trubek

Díky svým vlastnostem se polymerní trubky již od svého vynalezení v první polovině 20. století staly velmi využívanou komoditou. Nejběžnějším aplikačním rozdělením je rozdělení na tlakové a netlakové systémy. Jak název napovídá, tlakové trubky a potrubní systémy jsou při užívání pod stálým tlakem, který umožňuje přesun obsahu trubky. Typickým příkladem takového systému je rozvod pitné vody do domácnosti nebo distribuce plynů (především zemního plynu). Netlakové trubky a potrubí využívají gravitaci pro přemístění jejich obsahu. Zde jsou typickou aplikací odpadní systémy, od trubek vedoucích z domácnosti až po rozměrné trubky tvořící kanalizační systém měst, dopravující vodu nebo odpad do čisticích prostor.

## 1.2 Materiály polymerních trubek

Pro výrobu trubek se používají převážně materiály ze skupiny termoplastů, neboli materiálů složených z polymerů a přísad, které se vlivem tepelných účinků dají opakovaně formovat mezi tuhým a plastickým stavem [23]. Přísady dodávají materiálu charakteristické vlastnosti, potlačují nepříznivé aspekty a stabilizují jeho chování. Reaktoplasty (dříve termosety), které vlivem tepla můžeme formovat pouze jednorázově, jsou pro výrobu trubek používány zřídka, a to pouze pro speciální aplikace vyžadující specifické vlastnosti materiálu [23]. Nejpoužívanějšími termoplastovými materiály jsou polyvinylchlorid (PVC) a polyethylen (PE). Mezi další běžně používané materiály se řadí polypropylen (PP) nebo polybutylen (PB) [62]. Speciální materiály s lepšími mechanickými vlastnostmi (PE-X, CPVC, ...) jsou používány pro vedení horkých médií (rozvod teplé vody v domácnosti, podlahové topení) v tlakových systémech, nebo pro izolaci kabelů v netlakových systémech.

**Polyvinylchlorid** je nejrozšířenějším materiálem používaným pro výrobu polymerních trubek. Je vysoce inertní, což zajišťuje jak vysokou odolnost proti degradaci materiálu způsobenou přemístovaným obsahem, tak stálost složení přemístované látky. Nízká tepelná roztažnost zajišťuje stabilitu tvaru při vysokých teplotách, nicméně při nízkých teplotách dochází ke křehnutí, proto není materiál vhodný do proměnlivého, studeného prostředí. Při použití UV stabilizátorů vykazuje dlouhodobou životnost i při přímém slunečním záření [62]. Polyvinylchlorid je materiál tuhý, proto se skladují pouze rovné segmenty, které

je následně potřeba spojovat pomocí tvarovek. Nejčastěji se využívá pro odpadní kanalizaci, zavlažování, nízkotlaké rozvody vody a plynu nebo ochranu rozvodů elektrických i komunikačních kabelů [62, 48].

**Polyethylen** je oproti PVC pružnější, což umožňuje skladování navinutých trubek na bubnech a jejich snadnější přepravu. Pružnost také usnadňuje použití PE pod zemí, neboť elasticita materiálu snadno vykompenzuje pohyby zeminy a případné nerovnosti [9]. Pásmo provozních teplot polyethylenu je větší než u PVC, a to přesto, že má vyšší tepelnou roztažnost. Polyethylen se rozděluje do tří kategorií podle hustoty, která ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti: polyethylen s nízkou hustotou (LDPE), se střední hustotou (MDPE) a vysokou hustotou (HDPE). S rostoucí hustotou se zvyšuje pevnost, chemická i tepelná odolnost a snižuje se náchylnost ke creepu [62]. Trubky se dají jednoduše svařovat pomocí natavení obou konců a následného spojení segmentů, což vytvoří velmi kvalitní svarové spoje. Dlouhá životnost polyethylenu je ovlivněna také extrémně hladkým povrchem, na kterém nevznikají turbulence ani se nezachycují nečistoty, a inertností materiálu [9]. Klasickým využitím PE jsou rozvody vody, plynu, odpadní potrubí, vhodný je pro podzemní i nadzemní aplikace [45].

**Polypropylen** je nejlehčí polymerní materiál s vynikající chemickou odolností [23]. Disponuje také vysokou teplotní odolností a tuhostí. Používá se pro rozvody horké vody, rozvody chemicky agresivních látek a rozvody plynu [62].

**Polybutylen** je vysoce elastický materiál podobný polyethylenu, narozdíl od něj ale nevykazuje téměř žádný creep a je pevnější [62]. I jeho vysoká teplotní odolnost z něj dělá vhodný materiál pro rozvody vody a plynu.

Modifikací základních polymerních materiálů vznikly polymery pro speciální aplikace, vyznačující se vynikajícími vlastnostmi v určitém směru. Síťovaný polyethylen (PE-X) se vyznačuje provozními teplotami od záporných hodnot téměř až po teplotu varu [62], chlorovaný polyvinylchlorid (CPVC) má velmi vysokou maximální teplotu použití [23].

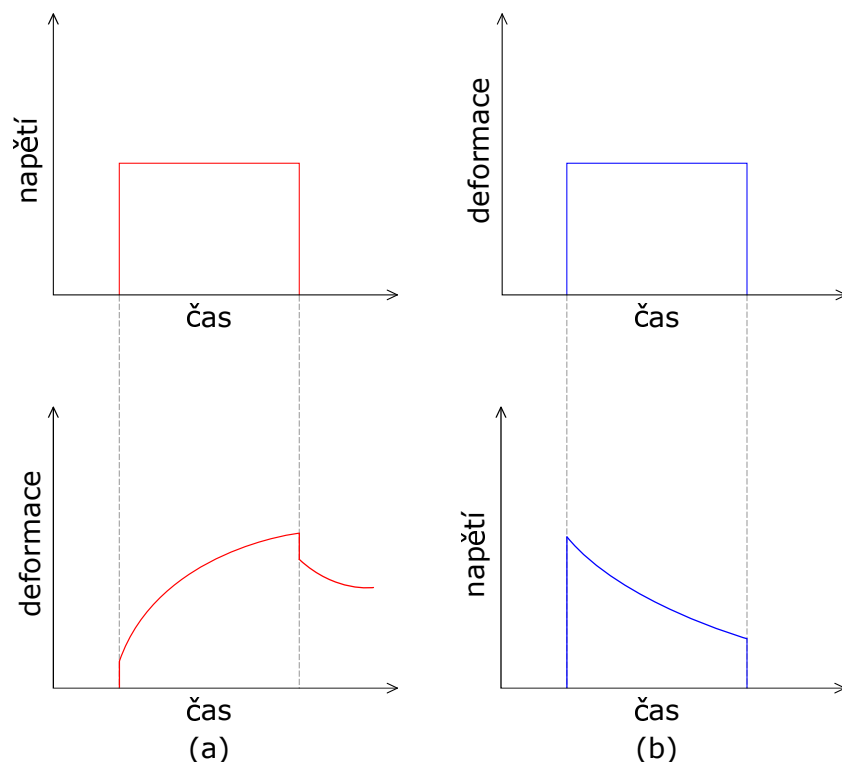
## 1.2.1 Mechanické vlastnosti polymerů

Polymery jsou skupina materiálů, která nabízí nejširší škálu hodnot mechanických vlastností ze všech dostupných materiálů. Oproti běžným konstrukčním materiálům je u nich důležitý i čas zatěžování jako parametr mechanických vlastností. Chování polymerů se mění v závislosti na čase, teplotě a typu zatěžování. Molekulární strukturou polymerů jsou dlouhé řetězce opakujících se základních atomárních skupin, tzv. *monomerů*, které tvoří nepravidelnou strukturu v rámci tělesa. Proto se jejich vlastnosti odvíjejí také podle hustoty, která vyjadřuje kompaktnost vytvořené struktury.

Základní vlastností polymerů je tzv. *viskoelastické chování*. Viskoelastické chování leží na pomezí elastického chování, vykazovaného tuhými látkami, a chování tekutin [41]. Polymerní materiály se v závislosti na působícím zatížení, teplotě a času deformují postupně,

jak dochází v jejich struktuře k rozplétání polymerních řetězců. Polymery se proto při dlouhodobém zatěžování přestávají chovat jako tuhé látky a začínají částečně vykazovat chování viskózních tekutin.

Nejnámějšími projevy viskoelastického chování jsou **creep** a **relaxace napětí**. Creep, česky tečení, je časově závislá plastická deformace zatíženého materiálu při zvýšené teplotě. Při creepu je zatížení konstantní, zatímco deformace po počáteční okamžité změně dále postupně narůstá. Při relaxaci napětí je těleso vystaveno konstantní deformaci, zatímco napětí v součásti se s časem postupně snižuje. Schematické průběhy deformace a napětí jsou zobrazeny na obr. 1.1.



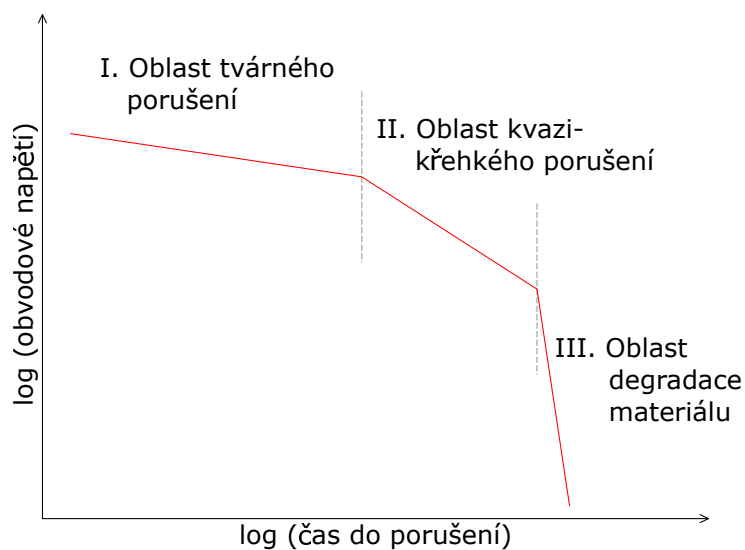
Obr. 1.1: Průběhy napětí a deformace při creepu (a) a relaxaci napětí (b) [45]

Polymerní řetězce a jejich atomy jsou vzájemně spojovány chemickými vazbami, mechanické vlastnosti se proto odvíjí jak od atomárního složení, tak od typů vazeb mezi jednotlivými atomy. Proto se hodnoty mechanických vlastností mohou výrazně lišit v závislosti na druhu polymeru. Tyto vazby mohou být porušovány například UV zářením, jehož působením dochází k degradaci materiálu, proto jsou velmi častou přísadou polymerů UV stabilizátory zajišťující jejich ochranu [29].

### 1.3 Typy porušování polymerních trubek

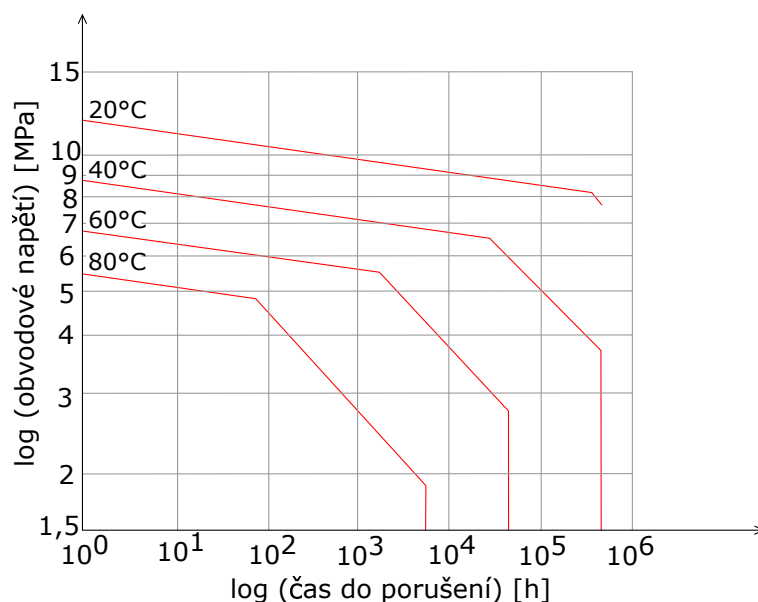
Trubky jsou namáhány vnitřním tlakem, který může způsobovat poškození během jejich provozu. V závislosti na velikosti zatěžujícího tlaku jsou rozlišovány tři základní typy

porušení. Jedná se o tvárné porušení, kvazi-křehké porušení a křehké porušení vlivem degradace materiálu. Závislost životnosti trubky na obvodovém napětí, která se vykresluje v logaritmických souřadnicích, je znázorněna na obr. 1.2.



Obr. 1.2: Schematické znázornění závislosti životnosti polymerní trubky na obvodovém napětí a příslušné typy porušení [24]

Jak již bylo zmíněno, mechanické vlastnosti polymerů jsou závislé na teplotě, a proto se v její závislosti také mění lokace křivky životnosti. Jak je popsáno například v článku [31] nebo technické zprávě [57], doba životnosti trubky se při zvýšené teplotě zkracuje. Tento vliv teplot je znázorněn na obr. 1.3.

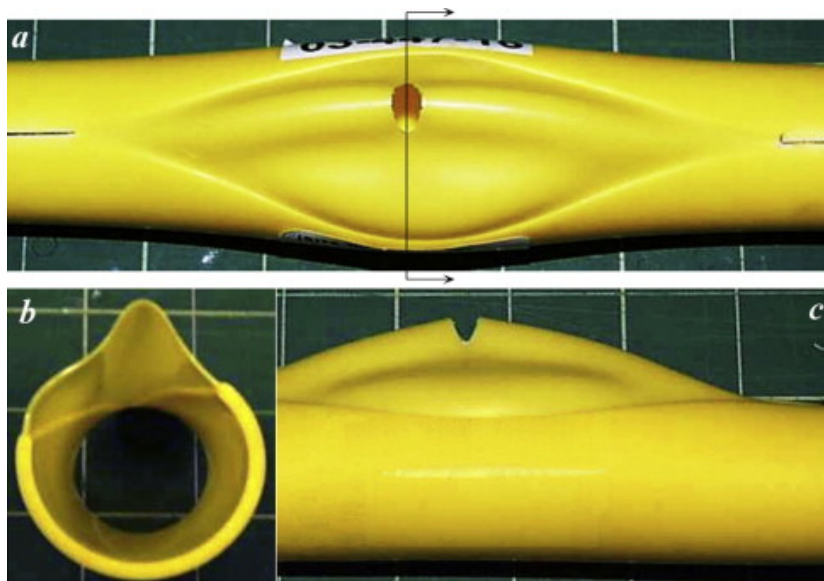


Obr. 1.3: Změna křivky životnosti polymerní trubky v závislosti na teplotě [57]

Následující rozdělení popisuje jednotlivé typy porušování materiálu, jak jsou uvedeny ve zdrojích [39, 24, 32].

### I. Tvárné porušení

Při velmi vysoké hodnotě tlaku nastává porušení tvárné, které se vyznačuje významnou plastickou deformací v oblasti poškození, tzv. *vydutím*. Tato oblast vzniká v nejslabší části stěny či v místě defektu, kde působí největší tahové napětí. Kvůli vysoké hodnotě tlaku je životnost trubky nejmenší, nicméně přetlaky při těchto zatíženích značně překračují běžné provozní hodnoty potrubních systémů a výskyt tohoto porušení není běžný. Fotografie trubky s tvárným porušením je na obr. 1.4.



Obr. 1.4: Tvárné porušení polyethylenové trubky [24]

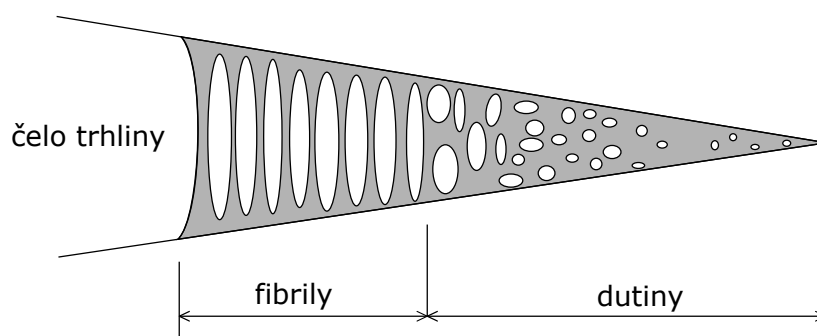
### II. Kvazi-křehké porušení

Nejčastějším typem poškození polymerních trubek je porušení kvazi-křehké, kdy se v malých defektech na vnitřní straně trubky, vzniklých například při výrobě, přepravě nebo instalaci potrubí, koncentruje napětí a vzniká trhlina, která nadále roste v radiálním směru trubky k vnějšímu povrchu. K porušení dochází během tří základních stádií, popsaných níže:

- (1) Iniclace trhliny v koncentrátoru napětí
- (2) Šíření trhliny mechanismem pomalého šíření trhliny
- (3) Dosažení nestabilního stavu a konečné porušení

Iniclace trhliny spočívá ve vytvoření dutinek v blízkosti defektu, kde se koncentruje napětí. Při dalším zatěžování dochází k plastické deformaci polymeru a spojování těchto dutinek. Vlivem stálého napětí dochází ke creepu tzv. *fibril*, což jsou přepážky mezi jednotlivými dutinami. Tyto dutiny a fibrily tvoří procesní zónu neboli křejz [7]. Při dalším namáhání dochází k porušení fibril a vytvoření trhliny. Schematické zobrazení křejzu je na obr. 1.5. Plastická deformace je tedy lokalizována

na malou oblast trhliny a jejího okolí. Po rozšíření trhliny se vlivem stálého napětí dutiny zvětšují a před nimi se tvoří nové dutinky. Tento jev se nazývá pomalé šíření (creepové) trhliny (z anglického slow crack growth – SCG).



Obr. 1.5: Schéma krejzu v polyethylenu [49]

Po dosažení určité kritické délky trhliny již materiál není schopen soudržnosti a poruší se. Zbývající materiál je buďto porušen tvárně, nebo dochází k přeměně mechanismu na tzv. *rychlé šíření trhliny* (z anglického rapid crack propagation – RCP) a k porušení materiálu bez výrazné plastické deformace ve zlomku vteřiny [24].

Životnost trubky se již nedá lehce ovlivnit snížením tlaku, jako tomu bylo u tvárného porušení. Fotografie trubky s kvazi-křehkým porušením je na obr. 1.6.



Obr. 1.6: Kvazi-křehké porušení polyethylenové trubky [22]



### III. Degradace materiálu a křehký lom

Při velmi nízkých hodnotách tlaku nastává porušení křehkým lomem, které je zapříčiněné degradací materiálu jako celku. Degradací porušení, jak lze vidět na obr. 1.2, není téměř vůbec závislé na hodnotě zatěžujícího tlaku, neboť se jedná o poškozování materiálu vnějšími vlivy jako oxidace, UV záření nebo agresivní prostředí, při kterém se snižují materiálové charakteristiky polymerů a dochází ke snadnému poškození. Mechanismus šíření trhliny je opět kvazi-křehký, označovaný jako ESC (z anglického environmental stress cracking) [39, 51].

## 1.4 Testování životnosti polymerních trubek

Základní zkouškou pro testování životnosti polymerních trubek je hydrostatická tlaková zkouška, jejíž postup je stanoven normou ČSN EN ISO 1167-1 [4]. Princip zkoušky spočívá v naplnění vyčištěného utěsněného vzorku vodou do dosažení určitého tlaku a následném měření doby do porušení materiálu a ztrátě těsnosti. Pro určení optimálního tlaku pro stanovenou teplotu a životnost v praxi se používá metoda extrapolace, která je definovaná normou ČSN EN ISO 9080 [6]. Běžné polymerní trubky by měly dosahovat životnosti 50 let při 20 °C. V této normě je mimo jiné požadován minimálně jeden vzorek s naměřenou dobou životnosti 9000 h pro každou testovanou teplotu, což svědčí o velké časové náročnosti této zkoušky. Právě kvůli této časové náročnosti, stejně jako náročnosti cenové a technické, byly vyvinuty zrychlené metody testování životnosti. Urychlení doby zkoušky může být dosaženo těmito způsoby [42]:

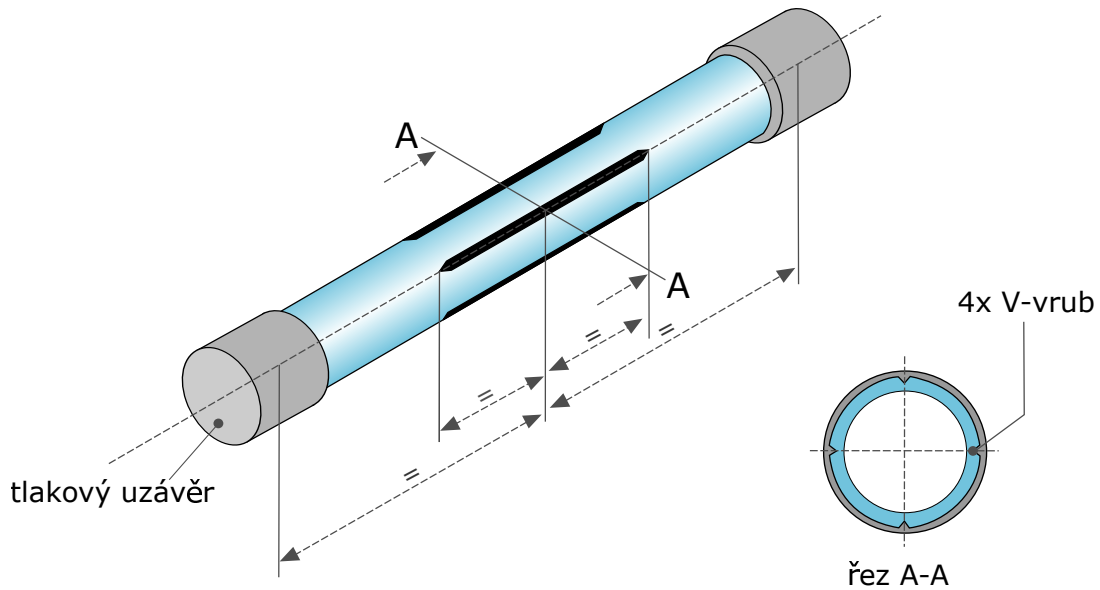
- Zvýšením teploty zkoušky
- Vytvořením koncentrátorů napětí (vruby)
- Použitím cyklického zatěžování
- Vytvořením chemicky agresivního prostředí

Zrychlené metody měří odolnost materiálu proti mechanismu pomalého šíření trhliny a nejsou tedy, oproti hydrostatické zkoušce, přesně schopny popsat životnost trubky při provozu. Jelikož je ale SCG nejobvyklejším mechanismem poškozování, je zjištění této odolnosti velmi žádoucí. Některé urychlené metody testování životnosti proti mechanismu pomalého šíření trhliny jsou popsány v následujícím rozdělení:

- Notched Pipe Test (NPT)

Notched Pipe Test je obdobou hydrostatické tlakové zkoušky, definovaný normou ČSN EN ISO 13479 [5]. Tato metoda je použitelná pro trubky s tloušťkou stěny větší než 5 mm. Urychlení zkoušky je dosaženo vytvořením čtyř podélných vrubů do hloubky 18–22 % tloušťky stěny. Průběh je shodný s průběhem hydrostatické tlakové zkoušky, výstupem je doba do porušení vzorku. Tato metoda je vhodná pro polyethyleny nižších řádů (např. PE80), životnosti se pohybují v rozmezí do 1000 h. Pro nové, odolnější polyethyleny (např. PE100, PE100RC) se životnost může pohybovat i v řádech tisíců hodin, proto se pro jejich testování využívají

modifikované podmínky [30] nebo jiné metody [16]. Typický vzorek používaný pro tuto zkoušku je zakreslen na obr. 1.7.

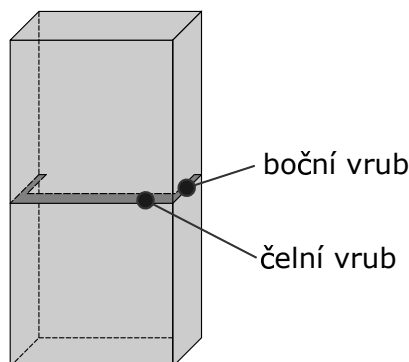


Obr. 1.7: Zobrazení testového vzorku pro zkoušku NPT [61]

- Pennsylvania Edge Notch Tensile (PENT) test

Pennsylvania Edge Notch Tensile test patří mezi nejpoužívanější urychlené zkoušky pro zjištění odolnosti materiálu proti šíření trhliny mechanismem SCG. Tato zkouška, jako všechny následující, není testem celého segmentu trubky, nýbrž spočívá ve vytvoření testovacího tělesa a jeho zatěžování. Testovací těleso i průběh zkoušky jsou předepsány normou ISO 16241 [25].

Testovací těleso je kvádr, vytvořený z lisované desky nebo připraven přímo z již vyrobené trubky, s doporučenou délkou 50 mm a rozměry podstavy 10 x 15–25 mm. Ve středu výšky tělesa jsou po obvodu vytvořeny tři vruby [33]. Hlavní, čelní vrub s hloubkou  $\approx 35\%$  tloušťky musí být vytvořen specifickou rychlostí nástroje zhruba  $300 \mu\text{m}/\text{min}$  pro dosažení optimálních výsledků [40]. Dva postranní vruby s hloubkou 0,5–1 mm způsobují šíření trhliny velmi podobné, jako je v trubkách [17]. Testovací těleso je zobrazeno na obr. 1.8. Test je prováděn za stálé teploty  $80^\circ\text{C}$  při namáhání tahem o stálé velikosti 2,4 MPa. Pomocí optického mikroskopu je měřena závislost rozevření trhliny (z anglického crack opening displacement – COD) na čase a díky této závislosti se dají spočítat parametry pro popis jejího šíření jako doba iniciace pomalého šíření trhliny, rychlost šíření trhliny a čas do lomu [40].



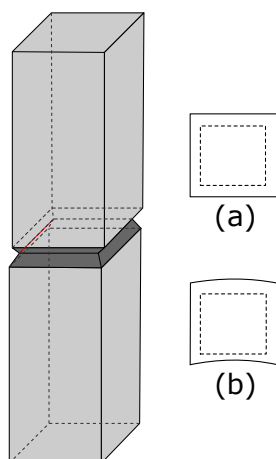
Obr. 1.8: Zkušební těleso pro PENT zkoušku [33]

- Full Notch Creep Test (FNCT)

Full Notch Creep Test je normován jako zkouška odolnosti materiálu proti ECS, ale díky shodnému mechanismu šíření trhliny SCG a ECS lze měřit obě odolnosti pomocí použití vhodného testovacího média (např. vzduch nebo voda pro SCG, Arkopal N 100 pro ECS) [51].

Norma ISO 16770 [26] definuje testovací těleso vyrobené z lisované desky nebo trubky, zobrazené na obr. 1.9, jako kvádr se čtvercovým průřezem, jehož rozměry se liší podle typu testu. Ve středu výšky je vytvořen obvodový vrub. Zkouška probíhá v nádobě vyplněné testovacím médiem o stálé zvýšené teplotě při namáhání konstantním tahovým napětím. Výsledkem testu je doba do porušení.

Přestože je zkouška FNCT především v Evropě velmi populární, stále vyvstává otázka její vhodnosti a legitimity výsledků, neboť naměřené hodnoty se mohou velmi lišit od výsledků jiných zkoušek [2] a povolené odchylky v podmínkách testu způsobují nemožnost přímého porovnání různých měření [43].

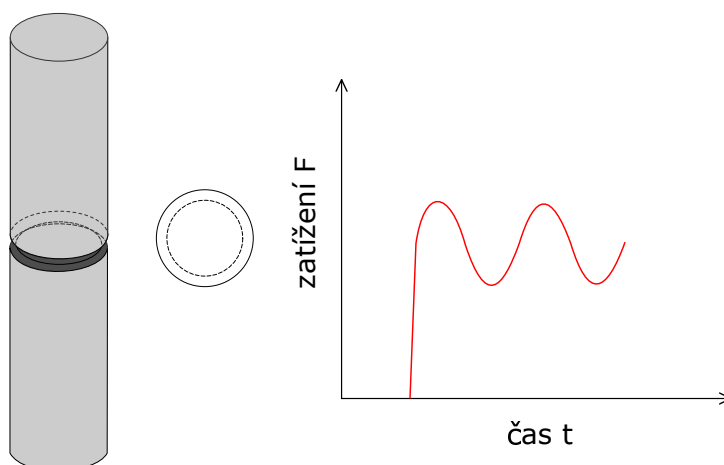


Obr. 1.9: Zkušební těleso pro FNCT zkoušku z (a) lisované desky (b) trubky [10]

- Cracked Round Bar (CRB) test

Z důvodu přílišné časové náročnosti některých zkoušek byl vyvinut Cracked Round Bar test, při kterém se narozdíl od předchozích zkoušek, využívajících zvýšených teplot, zatěhuje testovací těleso cyklicky. Tímto se dosahuje rychlých výsledků i za běžných provozních teplot. Norma ISO 18489 [27] definuje tvar vzorku jako válec s průměrem 14 mm a výškou 80–100 mm, s obvodovým vrubem do hloubky 1,5 mm. Cyklické tahové zatížení  $\Delta\sigma_0$  dosahuje hodnot 10,5–13,5 MPa podle velikosti vzorku se zatěžovacím poměrem  $R=0,1$  (poměr  $\sigma_{min}/\sigma_{max} = F_{min}/F_{max}$ ). Frekvence je předepsaná do velikosti 10 Hz, neboť vyšší frekvence mohou způsobit ohřátí materiálu a ovlivnění zkoušky [15]. Testovací těleso a schéma zatěžování je zobrazeno na obr. 1.10.

Při zkoušce se měří počet cyklů do lomu, který se následně vynese do grafu v závislosti na napětí  $\Delta\sigma_0$ . Pro daný materiál se test provádí pro různé hodnoty napětí a z bodů se provede korelace vyjadřující křivku odolnosti proti porušení [27]. Lze měřit také rozevření trhliny a díky ní získat závislost rychlosti šíření trhliny na velikosti faktoru intenzity napětí  $K_{I_{max}}$  [11, 13].



Obr. 1.10: Zkušební těleso pro CRB zkoušku a schéma zatěžování [13]

## 1.5 Spojování polymerních trubek

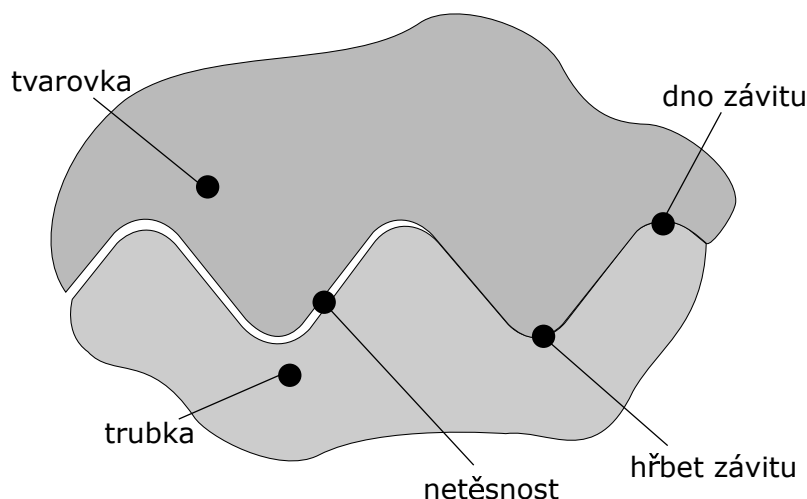
Jak již bylo zmíněno, trubky jsou vyráběny v kratších či delších úsecích pro jejich snadnější skladování a přepravu. Tyto délky ale často nejsou dostačující pro konstrukci vedení, stejně tak vyvstává otázka realizace změny jeho směru. Pro spojování jednotlivých segmentů se tedy používají různé druhy metod. Spojování pod úhlem se vždy realizuje pomocí tvarovek (např. kolena, T kusy) či armatur při nutnosti regulace proudění. Spojení rovnoběžné lze vytvořit tvarovkami, ale také bez nich v případě použití vhodných materiálů.

### 1.5.1 Rozpouštědlové lepení plastů

Přestože je v názvu metody psáno lepení, tento spoj je spíše na úrovni molekulární, než zapříčiněný adhezí a kohezí jako klasické lepení jak jej známe [56]. Rozpouštědlové lepení (z anglického solvent cementing) je nejčastější metodou spojování PVC nebo CPVC trubek [46] a umožňuje spojování různých typů plastů, pokud jsou oba materiály ovlivněny rozpouštědlem, které spoj zajišťuje. Tato podmínka zabraňuje použití této metody například pro polypropylen nebo polyethylen [54].

### 1.5.2 Šroubové spoje

Příkladem jednoduchého, snadno rozebíratelného spojení je spojení šroubové. Pomocí závitových hlav je na konci trubky vytvořen závit, který je následně spojen se závitovou tvarovkou. Závitů jsou normalizovány, což zajišťuje kompatibilitu protikusů, které nemusí být ze stejného materiálu. Nevýhodou tohoto spojení je jeho hrozící netěsnost, které se zabraňuje použitím těsnících past nebo pásek [19]. Schéma závitového spoje a netěsnících oblastí je na obr. 1.11.



Obr. 1.11: Schéma netěsnícího šroubového spoje [58]

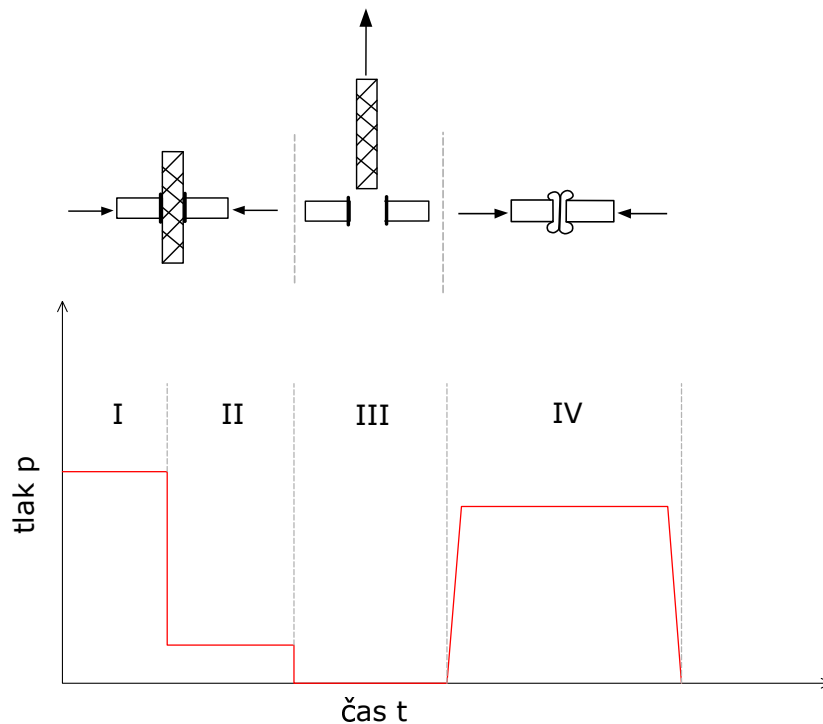
### 1.5.3 Polyfúzní svařování

Polyfúzní svařování využívá termoplastické vlastnosti materiálu, tedy toho, že při tepelném zatěžování dochází ke zvýšené mobilitě polymerních řetězců. Tato metoda umožňuje spojování trubek s tvarovkami. Část vnějšího povrchu trubky a vnitřního povrchu tvarovky je nahřáta pomocí polyfúzní svářečky. Následně jsou oba protikusy přitlačeny k sobě, čímž dojde k jejich spojení [53]. Během spojení zahřátých kusů dojde k prolnutí

jednotlivých řetězců a při vychladnutí, a tedy zamezení jejich mobility, dochází k vytvoření pevného spoje. Nejčastěji se touto metodou svařují trubky menších průměrů a to převážně ručně [59].

### 1.5.4 Svařování na tupo

Svařování na tupo je další metodou využívající natavení materiálu trubky. Tato metoda nevyžaduje pro rovnoběžné spojování použití tvarovek a je možné spojit přímo dva segmenty trubek, jejichž konce jsou předtím nahřáty pomocí speciálního topného tělesa. Proces je realizován ve čtyřech krocích [55, 59], zobrazených na obr. 1.12. V první fázi dochází ke kontaktu čelních ploch trubek a topného tělesa pod vysokým tlakem pro natavení materiálu. V druhé fázi je tlak redukován, což umožňuje zvětšení natavené zóny. Ve fázi třetí jsou trubky oddáleny od topného tělesa a to je vyjmuto. Tato fáze by neměla trvat déle než 3 vteřiny pro prevenci předčasného ztuhnutí materiálu [59]. V následující čtvrté fázi jsou k sobě tělesa přitlačena a pod stálým tlakem dochází k jejich vychladnutí a vytvoření spoje. V této fázi dochází k vytvoření pevnosti a těsnosti spoje, jehož vlastnosti se dají sledovat nedestruktivně podle vzhledu a vlastností výronku po jeho odstranění [59, 37]. Tato metoda je použitelná pro téměř jakékoliv rozměry trubek a lze ji provádět přímo na místě připojení, proto se stala velmi rozšířenou.



Obr. 1.12: Schéma metody a průběh tlaku při svařování na tupo [55]

## 1.5.5 Elektrofúzní svařování

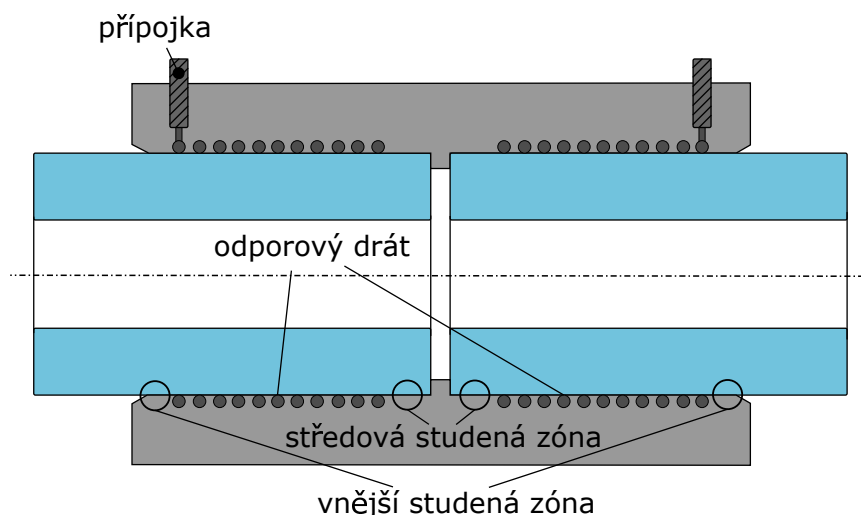
Elektrofúzní (odporové) svařování patří spolu se svařováním na tupo k nejčastějším způsobům svařování PE trubek. Používá se také pro polypropylen a další materiály s dobrou tepelnou tavitelností [39]. Jelikož je praktická část této práce zaměřena na modelování právě elektrofúzního spoje, je tato metoda popsána detailněji.

### Princip metody

Tepelného zatěžování je dosahováno speciální tvarovkou, tzv. *elektrotvarovkou*. Ta má ve svém objemu těsně pod vnitřním povrchem navinutý odporový drát, který se připojením externího zdroje elektrického napětí zahřeje a tím dojde k tavení materiálu tvarovky i vložených trubek. Při ochlazování dochází k zatuhnutí a vytvoření pevného spoje [59].

### Popis elektrotvarovky a pracovní konfigurace

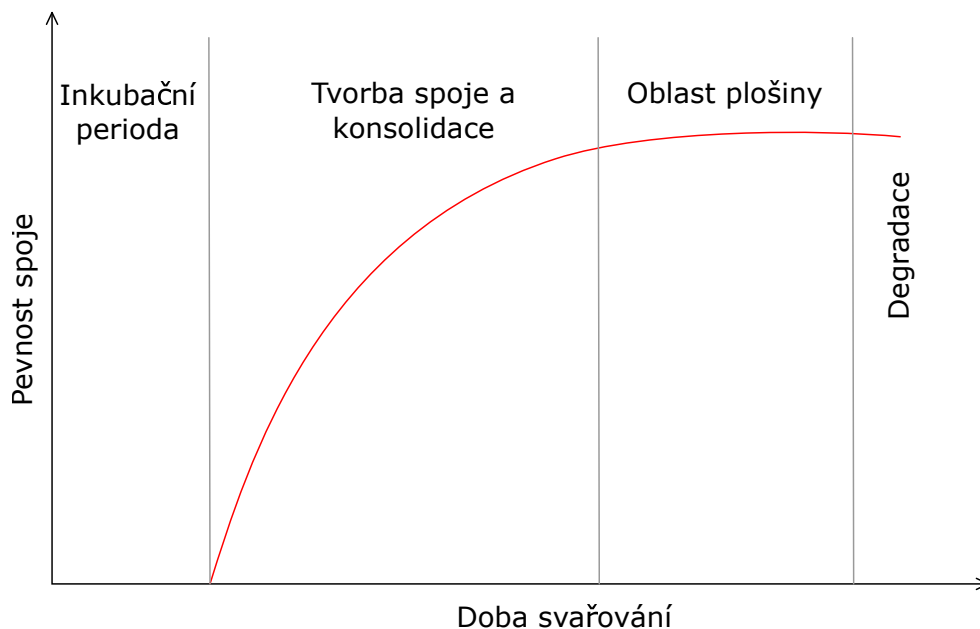
Elektrotvarovka je speciální tvarovka vytvořena pro elektrofúzní svařování. Vyrábí se v normalizovaných průměrech korespondujících s normalizovanými průměry trubek. Nejčastěji využívaným typem jsou elektrotvarovky s navinutým odporovým drátem, jehož zahřátím dochází k tavení materiálu tvarovky i trubek. Uprostřed délky se nachází zářka sloužící pro zajištění rovnoměrného zasunutí trubek. Na vnějších okrajích a ve středu se nachází tzv. *studené zóny* zamezující expanzi roztaveného materiálu mimo oblast svařování [52]. K vytvoření tlaku potřebného pro prolnutí polymerních řetězců slouží jak studené zóny, tak vůle mezi trubkou a tvarovkou, které byly empiricky určeny a jsou zahrnuty v geometrii elektrotvarovek. Pro připojení ke zdroji elektrického napětí se využívá přípojek vyvedených na povrch tvarovky. Schéma elektrotvarovky s odporovým drátem a vloženými trubkami je zobrazeno na obr. 1.13.



Obr. 1.13: Pracovní konfigurace elektrotvarovky a tlakových trubek [52]

## Postup vytvoření spoje

Elektrofúzní spoj získává svou pevnost v závislosti na čase svařování. Stanovený čas pro dosažení nejlepších výsledků bývá uveden výrobcí a byl experimentálně zjištěn [52]. Tento proces lze rozdělit do několika fází, například dle Troughtona [59], nebo dle Bowmana [3]. Označení jednotlivých fází v této práci vychází ze článku Bowmana, jejich oblasti v grafu závislosti pevnosti spoje na času lze vidět na obr. 1.14.



Obr. 1.14: Fáze elektrofúzního svařovacího procesu a tvorba pevnosti spoje [3]

### I. Inkubační perioda

Inkubační perioda je počátkem celého svařovacího procesu. Trubky a tvarovka jsou stále samostatnými segmenty a spoj nemá žádnou pevnost. Při připojení ke zdroji proudu a napětí se začíná ohřívat drát, který způsobuje tavení vnitřního povrchu elektrotvarovky a expanzi jejího materiálu. Po vyplnění mezery mezi trubkou a tvarovkou narůstá tlak a dochází k přenosu tepla vedením mezi tvarovkou a trubkou. To způsobí roztavení vnějšího povrchu trubky.

### II. Tvorba spoje a konsolidace

Při delší době svařování dochází k promísení materiálu trubky a elektrotvarovky a vzniká jednolitá oblast roztaveného materiálu, jejíž objem se s časem zvětšuje. Pro zabránění vytečení materiálu z oblasti svařování slouží studené zóny popsány výše. V této fázi narůstá tlak a teplota na rozhraní a vytváří se pevnost spoje.

### III. Oblast plošiny

V této fázi dochází k ustálení pevnosti spoje v závislosti na čase. Teplota, tlak i objem roztaveného materiálu narůstají a umožňují kompenzaci rozměrových odchylek



trubek a tvarovky bez významného ovlivnění pevnosti svaru. Na konci této fáze dochází k odpojení elektrotvarovky od externího zdroje napětí a proudu.

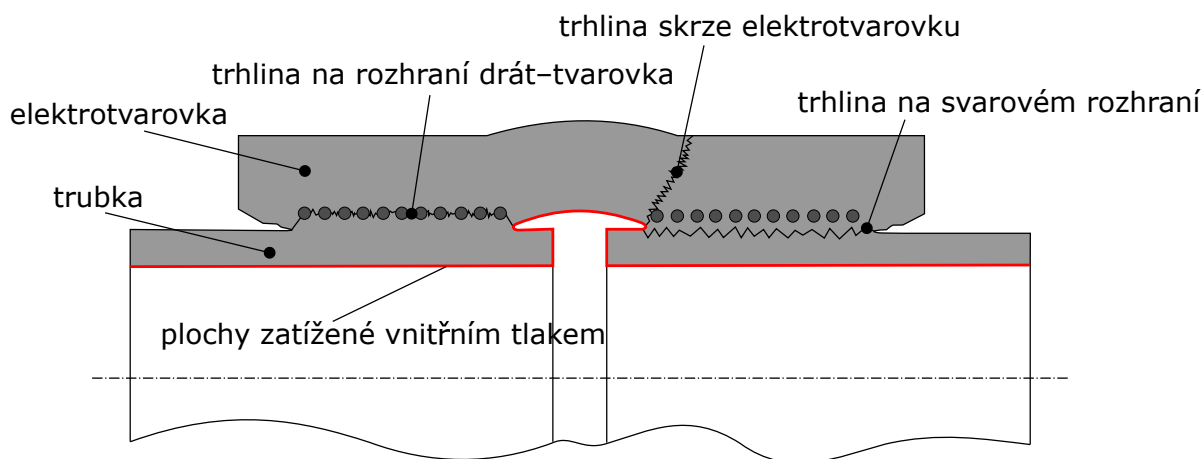
#### IV. Chladnutí

Po odpojení zdroje proudu dochází k chladnutí drátu a tedy i roztavené oblasti a tlak na rozhraní klesá. Polymer začíná krystalizovat, což je reakce exotermická, a teplota se po tuto dobu stabilizuje na hodnotě  $\approx 120$  °C. Po dokončení krystalizace začíná teplota a tlak dále klesat a materiál zmenšuje svůj objem. To je příčinou tvarové deformace trubek nebo vzniku dutin ve svarovém spoji.

Pokud by došlo k překročení stanovené doby svařování, mohlo by dojít k degradaci materiálu způsobené příliš vysokou teplotou, zobrazené na obr. 1.14, způsobující snížování pevnosti spoje.

#### Defekty a typy porušování

Při zatěžování elektrotvarovek dochází ke třem základním typům porušování, závislých na koncentrátoch napětí a především na pevnosti vytvořeného spoje. Mechanismy šíření trhlin jsou stejné jako v kapitole 1.3, převažuje tedy SCG. Typy porušení elektrofúzního spoje jsou: trhlina na svarovém rozhraní, trhlina skrze elektrotvarovku, trhlina na rozhraní drát–tvarovka [52]. Schéma jednotlivých typů je zobrazeno na obr. 1.15. Jejich výskyt, ovlivněný jednotlivými defekty, je popsán v rozdělení.



Obr. 1.15: Schematické zobrazení typů porušení elektrofúzního spoje [52]

Mechanické vlastnosti elektrofúzního svaru jsou přímo ovlivňovány výskytem defektů, které vznikají především při nesprávné přípravě jednotlivých kusů nebo chybným provedením metody svařování. Dle článku [52] se tyto defekty rozdělují do 4 základních skupin popsaných níže.

- Slabé rozhraní svaru

Slabé rozhraní svaru znamená nedostatečné propojení materiálu elektrotvarovky a trubky. Nedochází k vytvoření dostatečně silného svarového spoje a hrozí porušení. Toto porušení je nejčastěji typu trhliny na svarovém rozhraní.

Nejběžnějším defektem je nedostatečné provaření svaru (z anglického cold welding), který vzniká při příliš krátké době svařování nebo nízkém dodávaném výkonu. Spoj se sice vytvoří, ale jeho mechanické vlastnosti jsou velmi slabé a často dochází k lomu na rozhraní.

Při přípravě trubek pro vlastní svařování musí být odstraněna jejich povrchová vrstva, neboť dochází k její oxidaci během skladování. Její nedostatečné odstranění tvoří překážku ke kvalitnímu prolnutí materiálů a vytvoření pevného spoje.

Kvůli nekvalitnímu očištění povrchů před jejich svařováním také mohou překážku fúzi tvořit nečistoty (např. prach). Ty zkracují efektivní oblast svaru a oslabují jeho pevnost.

- Dutiny

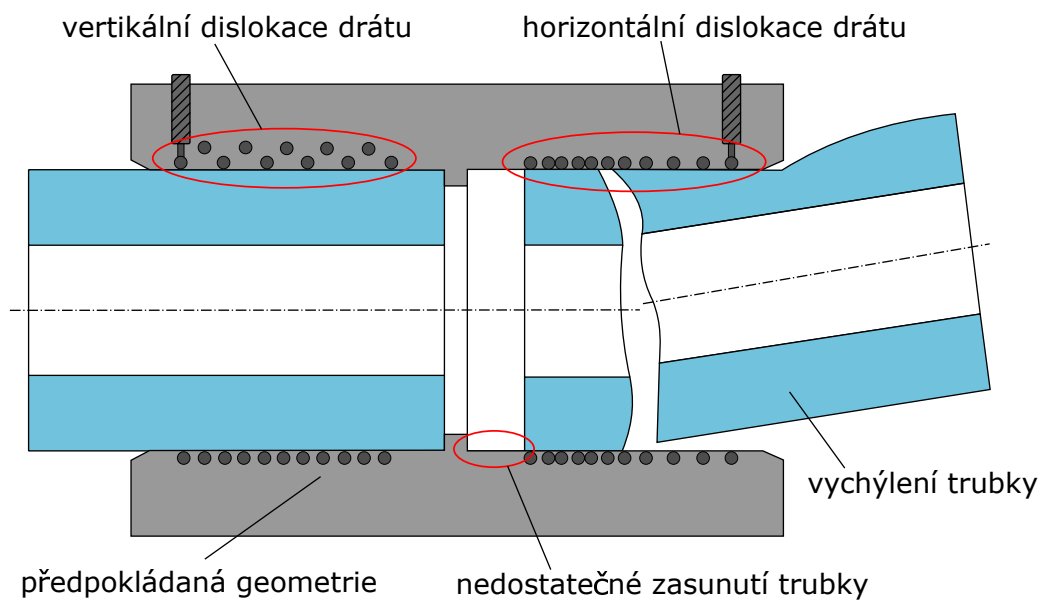
Během chladnutí polymeru dochází k jeho smršťování, jak již bylo zmíněno výše. Jelikož obsahuje konfigurace spojení před svařením mezeru mezi tvarovkou a trubkou, musí při chladnutí spoje docházet k deformaci nebo tvorbě dutin. Tyto dutiny mohou ovlivňovat mechanické vlastnosti spoje, a proto je názor na jejich toleranci výskytu velmi různorodý [3]. Pevnost fázového rozhraní může být snížena a dutiny se mohou stát koncentrátory napětí. Jejich přítomnost tedy může vyvolávat lom na svarovém rozhraní i skrze tvarovku.

- Nevhodná změna geometrie

Nevhodná změna geometrie (z anglického structural deformity) zahrnuje změny v geometrii tvarovky a trubek v průběhu svařovacího procesu. Těmi jsou především dislokace odporového drátu, nevhodná pozice trubky a její vychýlení. Nevhodná geometrie má za následek koncentraci napětí, které může iniciovat šíření trhliny skrze tvarovku. Schéma jednotlivých změn geometrie je na obr. 1.16.

- Nadměrné provaření svaru

Excesivní překročení doby svařování stanovené výrobcem má za následek degradaci materiálu tvarovky v okolí odporového drátu, kde je teplota nejvyšší. Mechanické vlastnosti svaru jsou sice dostatečné, slabým místem se ale stává objem elektrotvarovky a může docházet k lomu skrz rozhraní tvarovka–drát.



Obr. 1.16: Nevhodné geometrické uspořádání elektrotvarovky a polymerní trubky [52]

## 2 Lomová mechanika

Tělesa s trhlinou se zabývá disciplína zvaná lomová mechanika. Ta umožňuje mimo jiné popisovat napjatost v součásti a šíření trhliny nebo určovat zbytkovou životnost. Lomovou mechaniku lze rozdělit do dvou základních oblastí [60]:

- Lineárně elastická lomová mechanika (LELM)  
Principy lineárně elastické lomové mechaniky jsou omezeny podmínkou malé plastické zóny na čele trhliny. Je předpokládána platnost Hookova zákona. Jelikož v trubkách při šíření trhlín mechanismem SCG plastizuje materiál pouze v této malé oblasti, může být využito principu LELM. V následující kapitole proto bude tato oblast detailněji popsána.
- Elasto-plastická lomová mechanika (EPLM)  
Oblast EPLM rozšiřuje použitelnost LELM na velkou plastickou zónu, dokonce na zplastizování celého průřezu s trhlinou.

### 2.1 Lineárně elastická lomová mechanika – LELM

LELM má dva základní přístupy k popisu tělesa s trhlinou:

- Energetický přístup  
Princip energetického přístupu spočívá v energetické bilanci dané součásti. Pokud využitelná energie pro šíření trhliny převažuje odpor materiálu, nastává nestabilní šíření trhliny. Tento přístup, definovaný Griffithem, využívá základní parametr  $G$ , který se nazývá *rychlost uvolňování energie*, nebo také *hnací síla trhliny* [28]. K lomu dochází při překročení kritické hodnoty nazývané *lomová houževnatost*  $G_C$ , vyjadřující odpor materiálu proti vzniku nestabilně se šířící trhliny. Tento parametr je materiálovou charakteristikou a pro platnost energetického přístupu předpokládáme jeho nezávislost na tvaru a rozměrech součásti [1]. Podmínku nestability lze zapsat následovně:

$$G \geq G_C. \quad (2.1)$$

- Napětový přístup  
Novější přístup, sestavený Irwinem, využívá popisu lokálních polí napětí v okolí čela trhliny. Trhlina se chová jako singulární koncentrátor napětí, jehož velikost ve vrcholu trhliny teoreticky roste nade všechny meze. Proto není napětí vhodným parametrem pro popis tělesa s trhlinou a je zaveden nový parametr, tzv. *součinitel intenzity napětí*  $K$ , který přesně popisuje podmínky na čele trhliny lineárně elastického materiálu [1]. Detailněji se součinitelem intenzity napětí zabývá samostatná kapitola 2.1.1. Mezní hodnotou porušení je *lomová houževnatost*  $K_C$ , která je materiálovou charakteristikou stanovující odolnost materiálu proti iniciaci nestabilně

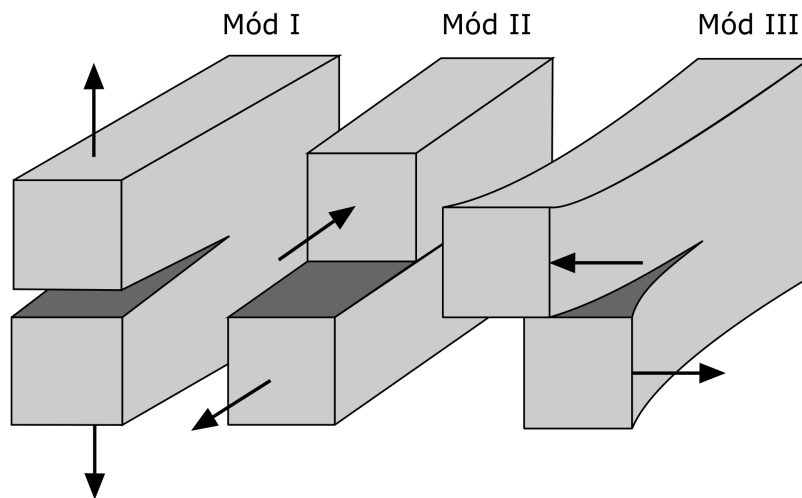
se šířící trhliny za podmínek rovinné deformace, jejíž velikost je ovlivňována především teplotou a rychlostí zatěžování [60]. Nestabilní šíření nastává při dosažení nebo překročení této kritické hodnoty:

$$K \geq K_C. \quad (2.2)$$

### 2.1.1 Součinitel intenzity napětí

Součinitel intenzity napětí SIF (z anglického stress intensity factor) popisuje napjatost na čele trhliny a je závislý na geometrii součásti i trhliny a vnějším zatěžování [21]. Značí se  $K_I$ ,  $K_{II}$  nebo  $K_{III}$  podle jednotlivých módů zatěžování, které jsou popsány níže [1, 60]. Schematické zobrazení jednotlivých módů je na obr. 2.1.

- Mód I  
Otevírací mód, napětí působí normálově k ploše trhliny a dochází k jejímu otevírání.
- Mód II  
Smyk působící v rovině trhliny, dochází k posunutí ve směru kolmém k čelu trhliny.
- Mód III  
Antirovinný smyk, posunutí je rovnoběžné s čelem trhliny.



Obr. 2.1: Zatěžovací módy trhliny [1]

Pro první mód zatěžování, který působí také v modelu elektrofúzního spoje této práce, se součinitel intenzity napětí vypočítá dle obecného vztahu [1]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot Y, \quad (2.3)$$

kde  $a$  je délka trhliny,  $Y$  je tzv. tvarová funkce závislá na rozměrech dané součásti a  $\sigma$  je nominální napětí působící v místě trhliny.

Článek [21] upravuje tento vztah pro trubku s vnitřním přetlakem a trhlinou šířící se z vnitřního povrchu na tvar:

$$K_{I,int} = \frac{p_{int} \cdot D}{s} \cdot \sqrt{\pi a} \cdot Y\left(\frac{a}{s}\right), \quad (2.4)$$

kde  $p_{int}$  je vnitřní tlak působící na trubku,  $D$  je vnější průměr trubky a  $s$  je její tloušťka. Tvarová funkce  $Y$  se spočítá jako:

$$Y = 0,3417 + 0,0588\left(\frac{a}{s}\right) - 0,0319\left(\frac{a}{s}\right)^2 + 0,1409\left(\frac{a}{s}\right)^3. \quad (2.5)$$

## Metody určování součinitele intenzity napětí

Součinitel intenzity napětí lze pro konkrétní konfiguraci získat různými způsoby rozděleními podle skript [60] do několika kategorií.

- Analytické metody

Použitelnost těchto metod je omezena především na rovinné úlohy. Patří mezi ně například princip superpozice nebo metoda váhových funkcí, jež jsou popsány v knize [1].

- Experimentální metody

Při experimentálních metodách se zatěžuje laboratorní vzorek a měří se jeho geometrické změny (otevření trhliny COD), nebo přímo mechanické napětí. K tomu se často využívá metod interferometrie a fotoelasticimetrie.

- Inženýrské metody

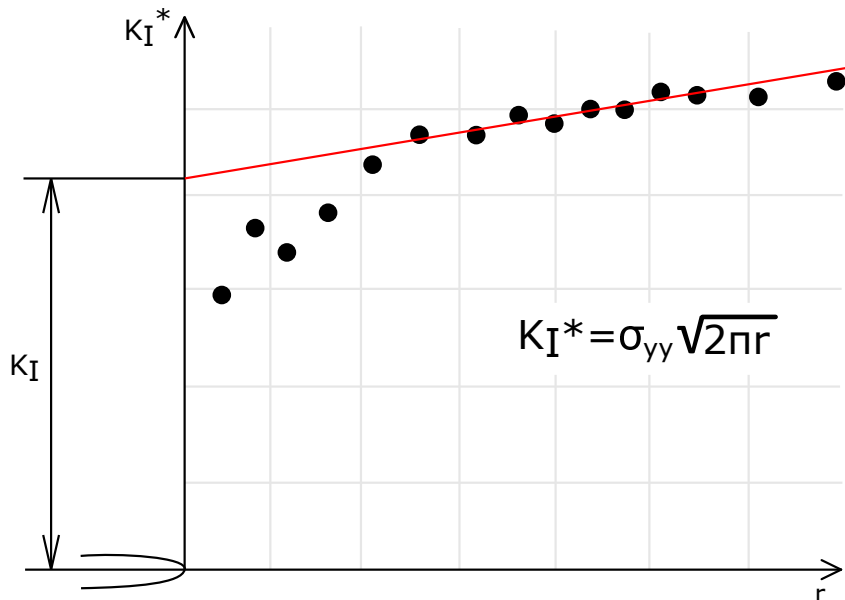
Inženýrské metody vycházejí ze základního vzorce (2.3) upraveného aplikací korekční funkce a zjednodušujících předpokladů. Součinitel intenzity napětí je počítán pomocí ostatních metod (především numerických). Pro různé tvary součástí a typy zatěžování byly vytvořeny vztahy pro analytický výpočet součinitele intenzity napětí s využitím charakteristických parametrů geometrie a zatížení. Tyto vzorce lze najít v příručkách (Murakami [38]).

- Numerické metody

Nejčastějším způsobem zjišťování součinitele intenzity napětí je v dnešní době metoda konečných prvků (MKP). Rozlišuje se několik metod vyhodnocení výsledků numerického modelování, disponujících rozdílnými výhodami a omezeními. Některé z nich jsou uvedeny v následujícím rozdělení.

- **Přímá metoda** je jednou z nejjednodušších metod výpočtu součinitele intenzity napětí. Tato metoda využívá numerického řešení výpočtu napětí či posuvů v okolí kořene trhliny a následného použití těchto hodnot v analytických vztazích. Pomocí hodnot napětí či posuvů v okolí kořene trhliny jsou vypočítány hodnoty  $K_I^*$  podle vzorce uvedeného na obr. 2.2. Tyto hodnoty jsou následně vyneseny do grafu a extrapolovány při zanedbání hodnot zatížených chybou

z důvodu singularity napětí v kořeni trhliny. Výsledná hodnota SIF odpovídá průsečíku extrapolované přímky s osou  $y$  ( $K_I^*$ ). Tato metoda je jednoduchá a snadno implementovatelná do komerčních programů, nicméně je potřeba přesně stanovit hodnoty napětí ve vyšetřované oblasti, což vyžaduje vysokou kvalitu sítě a tudíž i dlouhý čas výpočtu [20].



Obr. 2.2: Extrapolace dat přímé metody pro mód zatěžování I [20]

- **Metoda posunutých uzlových bodů** využívá upravených trhlinových prvků, které mají posunuté středové uzlové body směrem ke kořeni trhliny, díky čemuž lépe modelují singularitu napětí. Uzlové body jsou posunuty do 1/4 délky prvku. Díky nenáročnosti na úpravu sítě konečných prvků a vysoké přesnosti se jedná o jednu z běžně nepoužívanějších metod.
- **Metoda poddajnosti**, nazývána také metoda dvojího výpočtu [20], spočívá ve výpočtu energie napjatosti  $W$  pro původní trhlinu a trhlinu prodlouženou o stanovený přírůstek. Ten se obvykle volí jako délka jednoho prvku MKP. Výsledky jsou dostatečně přesné i při hrubší síti, nevýhodou je však nutnost provedení dvou výpočtů a nemožnost oddělení jednotlivých složek součinitele intenzity napětí.
- **Metoda J-Integrálu** je další energickou metodou, v tomto případě využívající skutečnosti, že v elastické oblasti přechází hodnota J-Integrálu, jednoho z hlavních přístupů EPLM, v hnací sílu trhliny. Tato metoda neklade vysoké nároky na hustotu sítě a dokáže, na rozdíl od metody poddajnosti, separovat jednotlivé složky SIF.
- **Interaction integral method**, využívaná při výpočtu součinitelů intenzity napětí v praktické části této bakalářské práce, je odvozena z metody J-Integrálu. Spočívá ve výpočtu J-Integrálu dvou rovnovážných polí, skutečného pole a pole doplňkového, což umožňuje odlišení jednotlivých zatěžovacích módů [50, 18].

Superpozicí těchto integrálů a integrační konstanty je získán integrál interakce popisující parametry na čele trhliny [18].

## 2.1.2 Trajektorie šíření trhliny

V předchozích kapitolách bylo popsáno, za jakých podmínek se bude trhlina v materiálu šířit. Podstatným parametrem je ale také směr tohoto šíření, který lze pomocí lomové mechaniky určit. Pro tuto predikci bylo vytvořeno mnoho kritérií, některé z nich jsou uvedeny v následujícím rozdělení [34]:

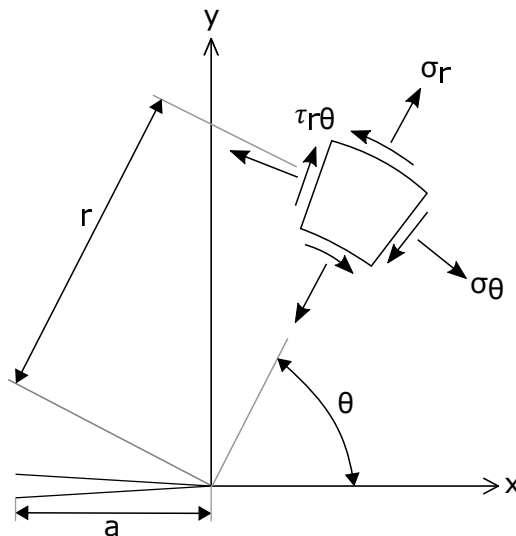
- Kritérium maximálního tangenciálního napětí – MTS

Pro určení směru šíření je využívána velikost obvodového napětí. MTS (z anglického maximum tangential stress) kritérium je použito v praktické části této práce, bude proto popsáno podrobněji.

První publikace formulující MTS kritérium je článek Erdogan a Siha [8] z roku 1963. Napětí se zde popisuje pro lokální polární souřadnicový systém. Při zvolení daného přírůstku  $r$  se bude trhlina šířit do místa ležícího na kružnici se středem v kořeni trhliny a poloměrem  $r$ , které disponuje největší hodnotou obvodového napětí  $\sigma_\theta$ . Tato podmínka se dá zapsat jako [34]:

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad \wedge \quad \frac{\partial^2 \sigma_\theta}{\partial \theta^2} < 0. \quad (2.6)$$

Úhel šíření je označován  $\theta$  a tvoří druhou polární souřadnici nového čela trhliny. Schéma souřadnicového systému a obvodového napětí je na obr. 2.3.



Obr. 2.3: Polární a kartézský souřadný systém v kořeni trhliny a směr obvodového napětí v bodě ve vzdálenosti  $r$  od počátku [63]



Pro kombinované zatěžování I. a II. módem lze úhel šíření vypočítat následujícím vztahem [34]:

$$K_I \sin(\theta) + K_{II}(3\cos(\theta) - 1) = 0, \quad (2.7)$$

kde  $K_I$  a  $K_{II}$  jsou součinitelé intenzity napětí pro jednotlivé módy zatěžování a  $\theta$  je úhel šíření trhliny. V této práci je využíván matematicky upravený vztah pro analytický výpočet [34]:

$$\theta = 2\arctan \frac{-2K_{II}}{K_I + \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}. \quad (2.8)$$

- Kritérium minimální hustoty deformační energie – SED

Trhlina se podle SED (z anglického strain energy density) kritéria bude šířit ve směru, ve kterém je hustota deformační energie nejmenší.

- Kritérium rozevření trhliny – CTD

Šíření trhliny se podle kritéria CTD (z anglického crack tip displacement) realizuje ve směru vektoru posuvu čela trhliny.

## 2.2 Životnost

Závislost rychlosti růstu trhliny  $da/dt$  na velikosti součinitele intenzity napětí  $K_I$  umožňuje vyjádření životnosti materiálu. Tato závislost má v logaritmických souřadnicích typický esovitý tvar schematicky znázorněný na obr. 2.4.

Podle chování trhliny lze rozdělit křivku na obr. 2.4 do tří základních oblastí [21]:

- Oblast I

První oblast, také nazývána prahová, se vyznačuje prudkou změnou rychlosti šíření trhliny v blízkosti tzv. *prahové hodnoty*  $K_{I,th}$ . Součinitel intenzity napětí se v této oblasti pohybuje okolo této hodnoty a při jejím překročení dochází k šíření trhliny. V opačném případě k šíření nedochází.

- Oblast II

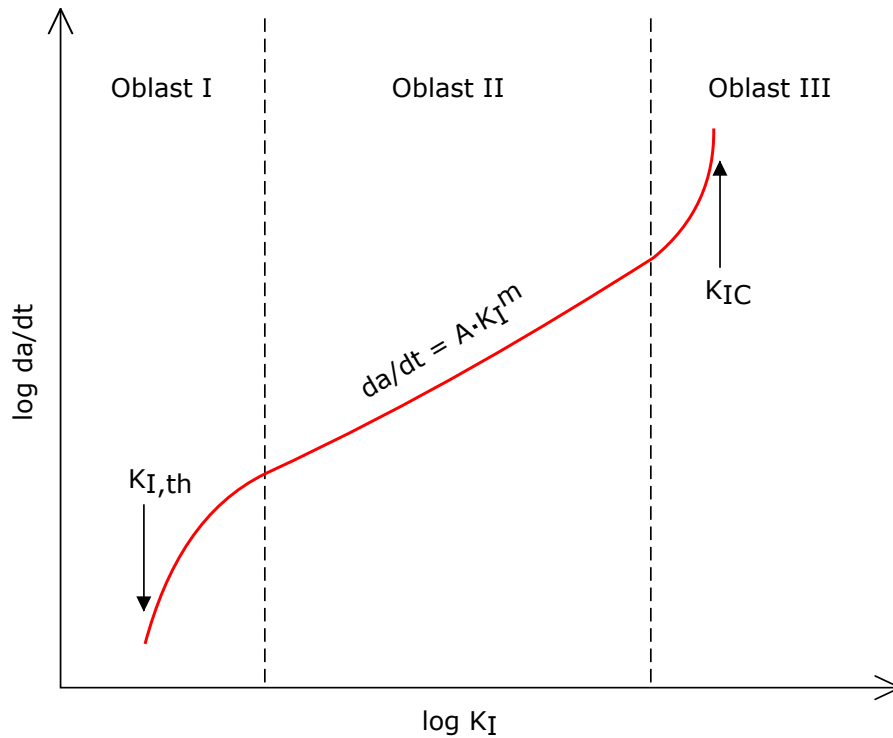
Tato oblast představuje stabilní šíření trhliny, popsatelné modifikovanou Paris–Erdoganovou rovnicí [21]:

$$\frac{da}{dt} = A(K_I)^m, \quad (2.9)$$

kde  $A$  a  $m$  jsou experimentálně určené materiálové parametry (např. z CRB testu).

- Oblast III

Při růstu hodnoty SIF k jeho kritické hodnotě  $K_{IC}$  dochází k prudkému nárůstu rychlosti šíření trhliny. Hypotézy pro tento prudký nárůst jsou tvorba mikroskopických trhlin napomáhajících urychlení šíření trhliny, nebo vliv plastické zóny na hnací sílu trhliny [1].



Obr. 2.4: Schematické zobrazení závislosti rychlosti růstu trhliny  $da/dt$  na součiniteli intenzity napětí  $K_I$  [21]

V oblasti stabilního šíření trhliny lze sestavit rovnici pro výpočet životnosti polymerní trubky zatížené vnitřním přetlakem  $p_{int}$  pro dosažení konečné délky trhliny  $a_f$  z délky trhliny počáteční  $a_0$ . Rovnici životnosti lze psát jako: [21]

$$t_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{A \cdot [K_I(p_{int}, D, s, a)]^m}, \quad (2.10)$$

kde  $D$  je vnější průměr trubky a  $s$  je tloušťka stěny trubky. Celková životnost trubky se skládá z doby iniciace trhliny a doby jejího šíření. Rovnice 2.10 určuje pouze dobu šíření trhliny, což znamená, že časový údaj není zcela přesný, nicméně je konzervativní a tudíž vhodný pro použití [14]. Obdobný postup lze uplatnit při výpočtu životnosti elektrofúzních spojů trubek a elektrotvarovek.

### 3 Charakteristika řešeného problému a cíle práce

Z rešeršní části plyne, že polymerní trubky jsou nejčastěji spojovány pomocí svařování na tupo nebo pomocí elektrotvarovek. Při svařování mohou vznikat koncentrátoři napětí nebo defekty na svarovém rozhraní, které napomáhají iniciaci trhlin. Tyto trhliny nadále rostou mechanismem SCG, až dojde ke ztrátě těsnosti trubky. Tento typ porušení je také nejčastěji pozorován v praxi. Z tohoto důvodu je potřeba těmto místům věnovat zvýšenou pozornost. Proto se tato práce věnuje predikci životnosti elektrotvarového spoje.

Pro predikci životnosti elektrotvarovek je nejčastěji využívána hydrostatická tlaková zkouška za vyšších teplot a následná aproximace výsledků na teploty provozní. Z důvodu velké časové náročnosti těchto zkoušek jsou v posledních letech častěji zaváděny zkoušky zrychlené, které využívají speciálních vrubovaných těles. Těmito zrychlenými zkouškami je měřena rychlost šíření trhliny mechanismem SCG, kterým jsou elektrotvarovky nejčastěji porušovány. Při znalosti rychlosti šíření trhliny v daném materiálu lze životnost odhadnout výpočtem využívajícím lineární elastické lomové mechaniky. Kvůli komplexní geometrii elektrotvarovky je nutno určit lomově-mechanické parametry pomocí numerického modelování, čímž se zabývá praktická část této práce.

Cíle práce se dají formulovat do dílčích částí následovně:

- Vytvoření numerického modelu spoje elektrotvarovky a polymerní trubky s okrajovými podmínkami představujícími zatěžování trubky při laboratorním testování životnosti.
- Simulování šíření trhliny pomocí metody konečných prvků v prostředí ANSYS APDL a výpočet hodnot součinitele intenzity napětí pro dané délky trhliny.
- Sestavení závislosti velikosti součinitele intenzity napětí na délce trhliny a následný výpočet odhadu životnosti spoje.
- Sledování změn velikosti součinitele intenzity napětí při změnách geometrie elektrotvarovky nebo pracovní konfigurace.

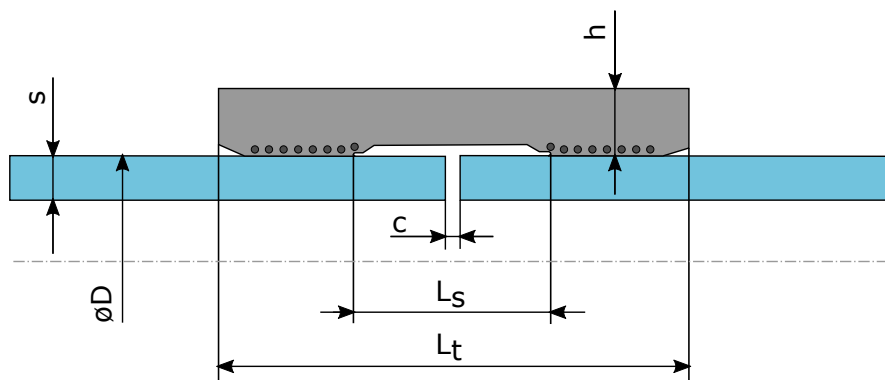
## 4 Realizace řešení

Cíle této bakalářské práce obsahují vytvoření numerického modelu elektrofúzního spoje elektrotvarovky a trubky a určení závislosti součinitele intenzity napětí na délce trhliny pro základní konfiguraci a pro změny rozměrových parametrů. Pro získání hodnot součinitele intenzity napětí bylo potřeba simulovat šíření trhliny, protože trajektorie jejího růstu není předem známá. Směr šíření této trhliny byl v každém kroku určen kritériem MTS, popsáním v kapitole 2.1.2.

Tomuto procesu je věnována tato kapitola. Numerické modelování bylo realizováno v klasickém prostředí komerčního programu ANSYS 2021 R1 s využitím programovacího jazyka APDL (Ansys Parametric Design Language). Pro zpracování výsledných dat byly použity programy MATLAB R2020b a Microsoft Excel.

### 4.1 Model geometrie

Pro výpočet byl použit model spoje HDPE trubky D160 (s vnějším jmenovitým průměrem 160 mm) SDR11 (z anglického standard dimension ratio – poměr mezi vnějším průměrem a tloušťkou stěny) a odpovídající elektrotvarovky. Model byl vytvořen bez uvažování jakýchkoliv defektů s předpokladem homogenního svaru. Schéma geometrie se základními rozměry je na obr. 4.1 a použité rozměry v tabulce č. 4.1.



Obr. 4.1: Model geometrie elektrofúzního spoje s vyznačenými základními rozměry [47]

Modifikované modely představují 6 změn geometrie elektrotvarovky či pracovní konfigurace spoje. Uvažované změny jsou schematicky zobrazeny na obr. 4.2. V následujícím rozdělení jsou popsány jednotlivé modifikace:

1. Menší tloušťka stěny elektrotvarovky
2. Větší tloušťka stěny elektrotvarovky
3. Větší vzdálenost zasunutých trubek v elektrotvarovce
4. Blíže svařené trubky – kratší středová studená zóna

5. Dále svařené trubky – delší středová studená zóna
6. Základní geometrie s hliníkovou vrstvou na vnějším povrchu elektrotvarovky

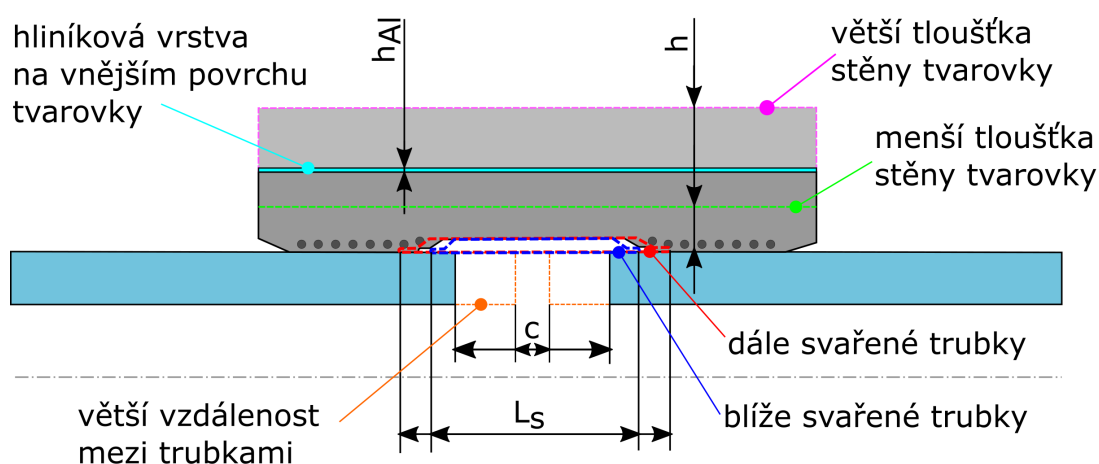
Hodnoty změřených parametrů jsou uvedeny v tabulce č. 4.2

Tab. 4.1: Rozměry základního modelu

Rozměr	Hodnota
D	160 mm
s	14,6 mm
h	20 mm
c	1 mm
$L_t$	180 mm
$L_s$	21,5 mm

Tab. 4.2: Modifikované rozměry

Modifikace	Změna
1	$h = 16$ mm
2	$h = 24$ mm
3	$c = 8$ mm
4	$L_s = 18$ mm
5	$L_s = 25$ mm
6	$h_{Al} = 0,5$ mm



Obr. 4.2: Schematické znázornění uvažovaných modifikací

Modifikované modely byly vytvořeny pro možnost určení vlivů daných parametrů na velikost součinitele intenzity napětí a tím i na životnost spoje.

## 4.2 Model materiálu

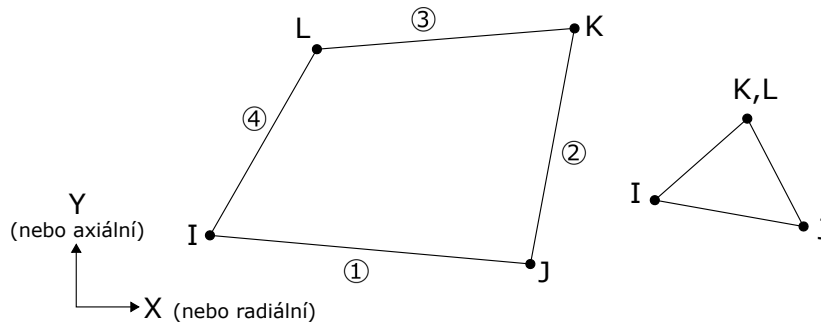
Šíření trhliny v polymerních trubkách je díky existenci malé plastické zóny v okolí kořene trhliny popsatelné pomocí parametrů lineární elastické lomové mechaniky, přiblíženými v kapitole 2. Při modelování je použito lineárně elastického izotropního modelu materiálu. Základní materiálové charakteristiky potřebné pro vytvoření lineárního modelu materiálu jsou Youngův modul a Poissonův poměr pro uvažovaný HDPE materiál [11]. Pro modifikaci č. 6 byly specifikovány tyto charakteristiky také pro materiál hliníkové vrstvy [36]. Použité hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 4.3

Tab. 4.3: Materiálové charakteristiky pro HDPE a hliník

Materiál	Materiálová charakteristika	Hodnota
HDPE	Youngův modul $E$	900 MPa
	Poissonův poměr $\mu$	0,35
Hliník	Youngův modul $E$	69000 MPa
	Poissonův poměr $\mu$	0,33

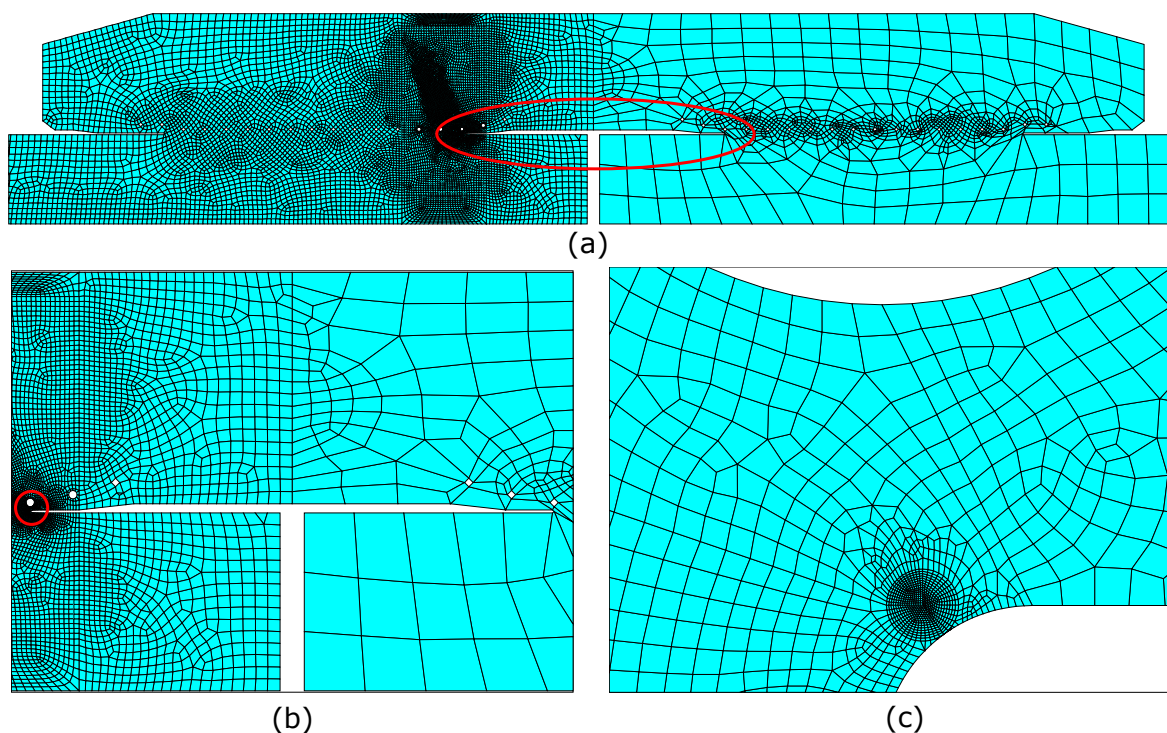
### 4.3 Model diskretizace

Pro diskretizaci byly použity prvky PLANE182. Jedná se o lineární 2D prvky definované jedním uzlem se dvěma stupni volnosti – posuvy ve směrech os souřadného systému – v každém vrcholu. Prvek a jeho degenerovaná podoba jsou zobrazeny na obr. 4.3. Výpočet je možné zjednodušit využitím rotační symetrie a model je proto vytvořen pouze v meridiánovém řezu. V programu ANSYS je jako osa rotace vždy uvažována osa  $y$ . Při šíření trhliny v rotačně symetrickém modelu je daná trhlina tedy brána jako obvodová. Ve skutečnosti se trhlina nemusí šířit po celém obvodu a součinitel intenzity napětí tedy bude nižší. Proto je navržený model konzervativní.



Obr. 4.3: 2D prvek PLANE182 [44]

Model byl rozdělen na několik ploch z důvodu využití rozdílných velikostí prvků. V oblastech, kde nejsou vyhodnocovány výsledky, byla použita hrubší síť. Naopak v okolí kořene trhliny, kde je potřeba co nejpřesněji určit součinitel intenzity napětí, byla vytvořena velmi jemná a pravidelná síť. Takovéto rozdělení umožňuje snížit čas výpočtu, který je závislý na počtu prvků. Zobrazení sítě s detailem okolí kořene trhliny je na obr. 4.4.



Obr. 4.4: (a) síť modelu elektrofúzního spoje (b) detail oblasti středové studené zóny (c) detail oblasti mezi vrubem a dutinou odporového drátu

## 4.4 Model zatížení a okrajových podmínek

Okrajové podmínky a zatížení byly voleny tak, aby co nejpřesněji vystihovaly stav, který nastává při testování životnosti trubek a jejich spojů hydrostatickou tlakovou zkouškou, jak je popsáno v kapitole 1.4.

Model byl zatížen vnitřním tlakem, který odpovídá hodnotám obvodového napětí 4 nebo 10 MPa, jehož rozsah pokrývá obvyklé hodnoty napětí při hydrostatických zkouškách. Velikost tlaku se určí ze vzorce [6]:

$$p_{int} = \frac{2 \cdot \sigma_{\theta} \cdot s}{D - s}, \quad (4.1)$$

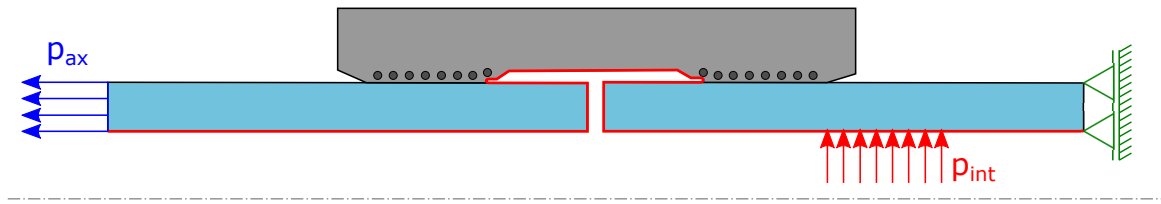
kde  $p_{int}$  je vnitřní tlak působící na trubku,  $\sigma_{\theta}$  je obvodové napětí,  $s$  je tloušťka trubky a  $D$  její vnější průměr.

Uzavření testovaného vzorku v obou směrech je představeno zamezením posuvu jedné hrany modelu ve směru osy rotace, protější hrana je zatížena tahovým napětím v axiální směru, jehož hodnota se určí ze vzorce:

$$p_{ax} = \frac{p_{int} \cdot \left(\frac{D}{2} - s\right)^2}{D \cdot s - s^2}, \quad (4.2)$$

kde  $p_{ax}$  je axiální napětí (tlak),  $p_{int}$  je vnitřní tlak,  $D$  je vnější průměr trubky a  $s$  její

tloušťka. Schematické zobrazení okrajových podmínek a aplikovaného zatížení je provedeno na obr. 4.5

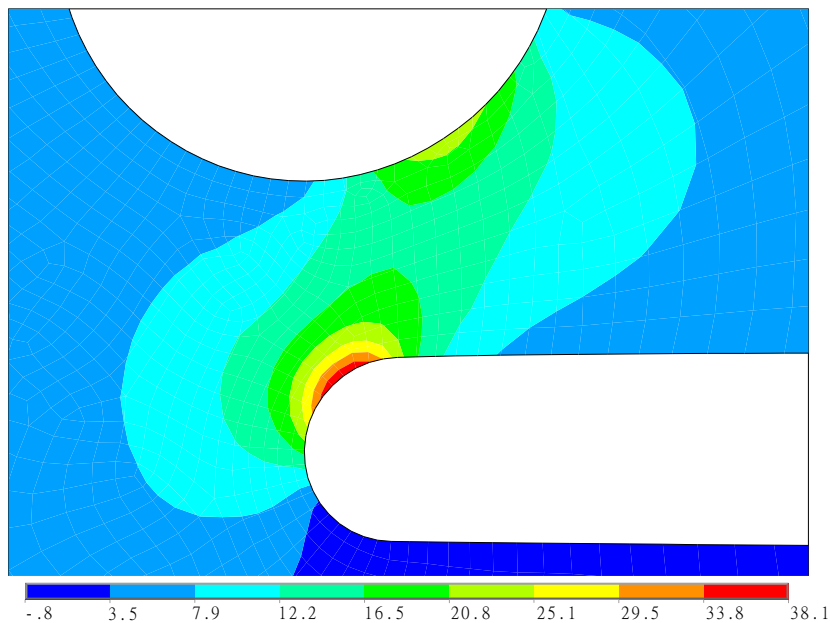


Obr. 4.5: Schematické zobrazení aplikovaného zatížení a okrajových podmínek [47]

## 4.5 Postup výpočtu

Po vytvoření modelu geometrie a jeho diskretizaci, nastavení okrajových podmínek a aplikování zatížení je model připraven pro simulaci šíření trhliny.

Jak je popsáno například v článku [12], trhlina se iniciuje z vrubu vytvořeného na rozhraní svaru tvarovky a trubky, který je koncentrátorem napětí. Vrub byl modelován jako půlkruhový, aby se předešlo případnému vytvoření singularity, a místo iniciace trhliny bylo určeno pomocí maximální hodnoty prvního hlavního napětí, které představuje napětí otvírací. Rozložení prvního hlavního napětí v oblasti vrubu je zobrazeno na obr. 4.6. V tomto místě byly s využitím interaction integral method vypočteny hodnoty  $K_I$  a  $K_{II}$ , ze kterých byl určen úhel směru šíření trhliny kritériem MTS.

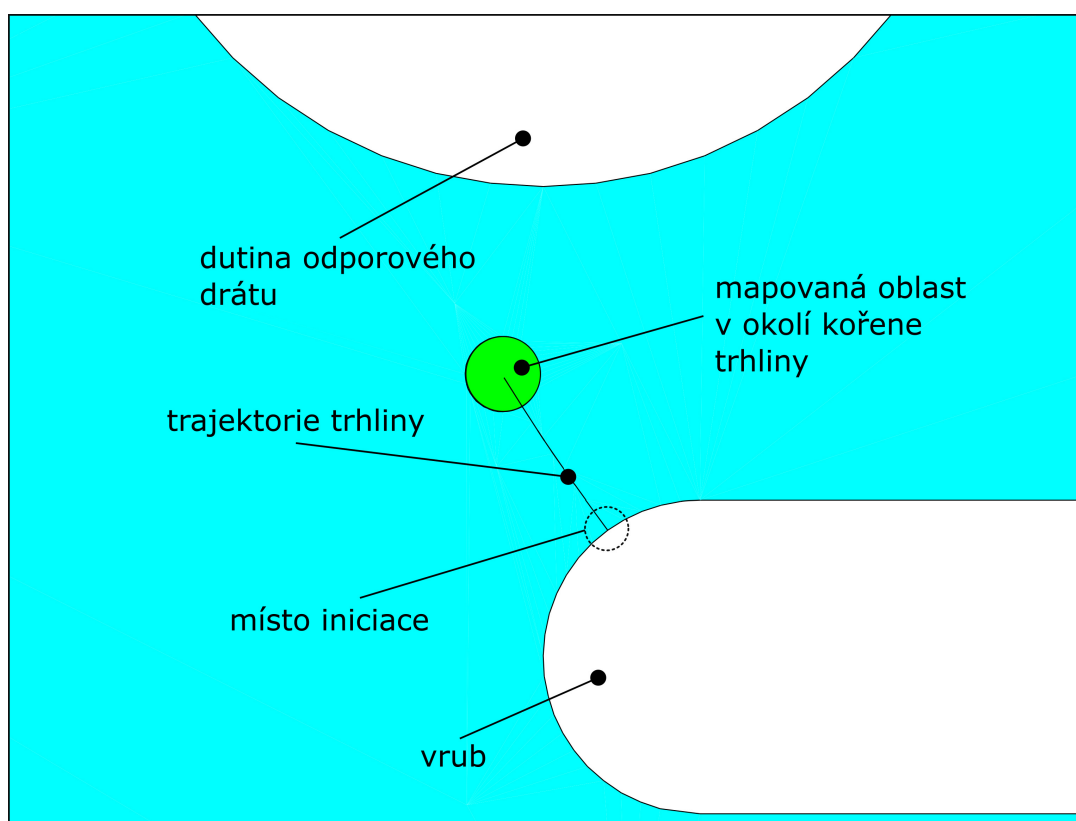


Obr. 4.6: Rozložení prvního hlavního napětí v oblasti iniciace trhliny



V místě maximální hodnoty prvního hlavního napětí byl vytvořen první přírůstek trhliny rozdělením linky vrubu dvěma body a přidáním dvou linek tvořící líc trhliny, spojující se v jednom bodě, který představuje nově vytvořený kořen trhliny. V kořeni trhliny byly opět vypočteny hodnoty  $K_I$  a  $K_{II}$  pro výpočet směru šíření v dalším kroku.

V každém dalším kroku byly vytvořeny nové linky představující přírůstek trhliny a celý postup síťování a výpočtu byl opakován, dokud se trhlina nedostala do blízkosti dutiny odporového drátu. Zobrazení tohoto šíření je na obr. 4.7. V této situaci byla trhlina spojena pod vypočteným úhlem šíření s dutinou. Tímto spojením došlo ke ztracení kořene trhliny a byl proto znovu proveden výpočet prvního hlavního napětí pro určení místa iniciace trhliny šířící se z dutiny dále skrze tvarovku. Celý proces byl realizován automatizovaným makrem v jazyce APDL, které je k práci přiloženo.

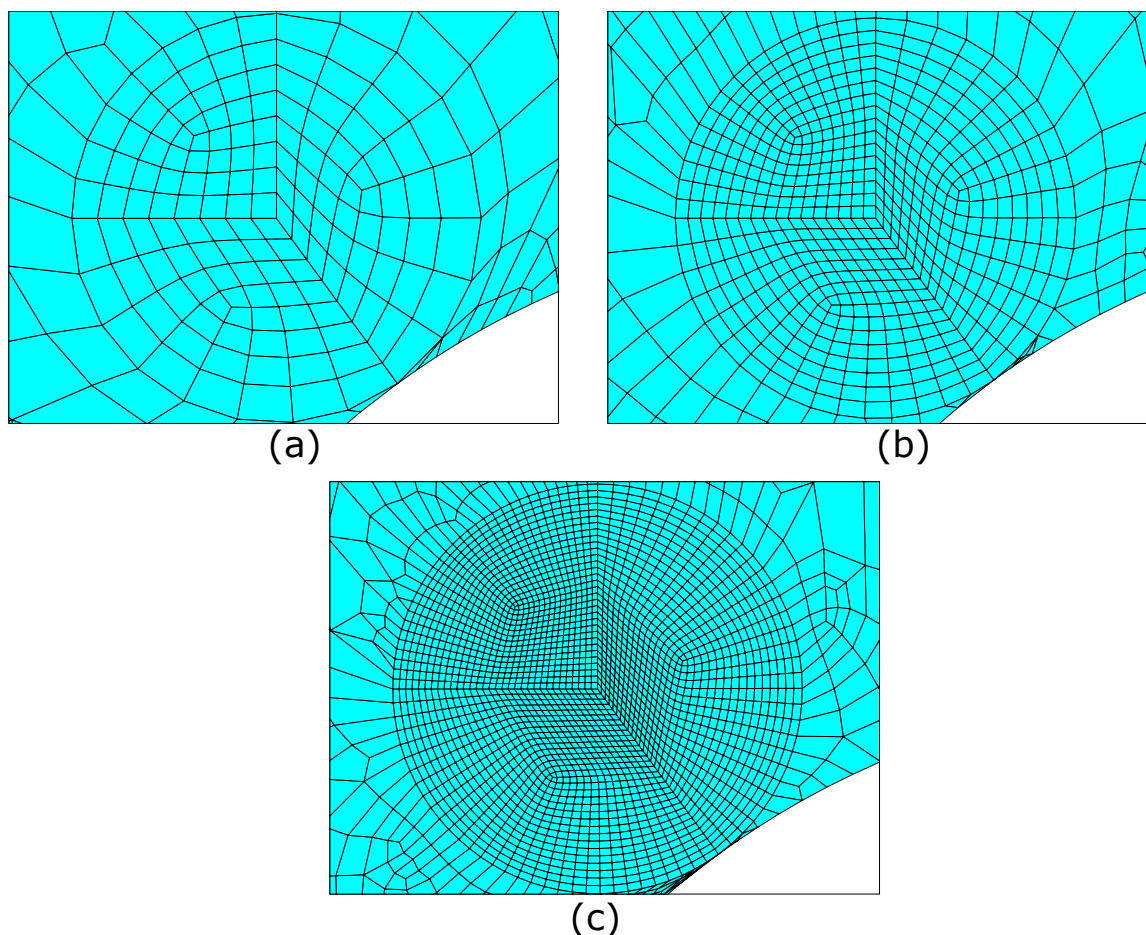


Obr. 4.7: Zobrazení šíření trhliny mezi vrubem a dutinou odporového drátu

Jak vyplývá například z práce [35], velikost přírůstku přímo ovlivňuje přesnost výpočtů. Při využití velmi malého přírůstku simulovaná trajektorie trhliny nejlépe představuje trajektorii získanou při laboratorním testování. Malý přírůstek ovšem znamená delší strojový čas výpočtu, proto je potřebné zvolit jeho optimální velikost. V této práci je počítáno s velikostí přírůstku 0,03 mm, který je řádově menší než uvažované přírůstky v práci [35], a proto by měl poskytovat dostatečně přesné výsledky s přijatelnou výpočetní rychlostí.

## 4.6 Kvalita sítě a její vliv na hodnoty součinitele intenzity napětí

Pro prohlášení naměřených výsledků za platné je potřeba využít dostatečně kvalitní síť. Při úlohách statické analýzy obvykle platí, že pokud se při dvojnásobném zjemnění sítě výsledky nezmění o více než 5%, lze je považovat za reprezentativní. Porovnávány byly výsledky pro tři rozdílné velikosti prvku v oblasti jemné mapované sítě v blízkosti kořene trhliny. Hustoty sítě jsou zobrazeny na obr. 4.8.



Obr. 4.8: Hustota sítě v okolí kořene trhliny pro velikost prvku ESIZE a) 0,01 b) 0,05 c) 0,025

Pro ověření kvality sítě byl zkoumán vliv velikosti prvků v okolí kořene trhliny na hodnotu součinitele intenzity napětí  $K_I$ . Pro výpočty byl zvolen první krok při simulaci šíření trhliny, tj.  $a = 0,03$  mm. Výsledky lze vidět v tab. 4.4. Z porovnání plyne, že výsledná hodnota  $K_I$  prakticky nezávisí na zvolené velikosti prvků. Čas výpočtu byl pro všechny varianty prakticky shodný a pro další výpočty proto byla zvolena varianta se střední velikostí prvků.

Tab. 4.4: Závislost součinitele intenzity napětí na velikosti prvku mapované oblasti pro první krok šíření trhliny při obvodovém napětí 4 MPa

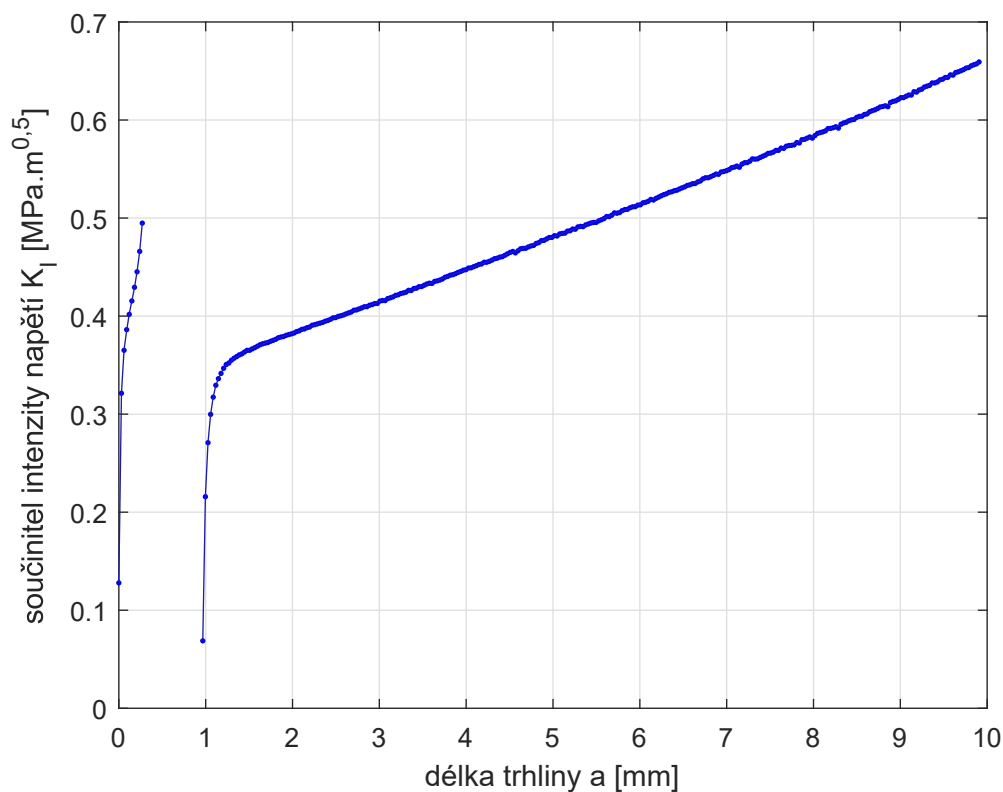
Velikost prvku ESIZE	$K_I$ [MPa · m <sup>0,5</sup> ]	Rozdíl (%)
0,01	0,3194	
0,005	0,3213	0,61
0,0025	0,3221	0,26

## 5 Analýza výsledků

V této kapitole jsou vyhodnocena data získaná z výpočtů v programu ANSYS, především závislost součinitele intenzity napětí na délce trhliny a životnost spoje.

### 5.1 Závislost součinitele intenzity napětí na délce trhliny

Jak již bylo zmíněno, numerický výpočet se zaměřoval na výpočet hodnot součinitele intenzity napětí v každém kroku šíření trhliny. Díky tomuto byla získána závislost jeho velikosti na délce trhliny. Tento graf je zobrazen na obr. 5.1.

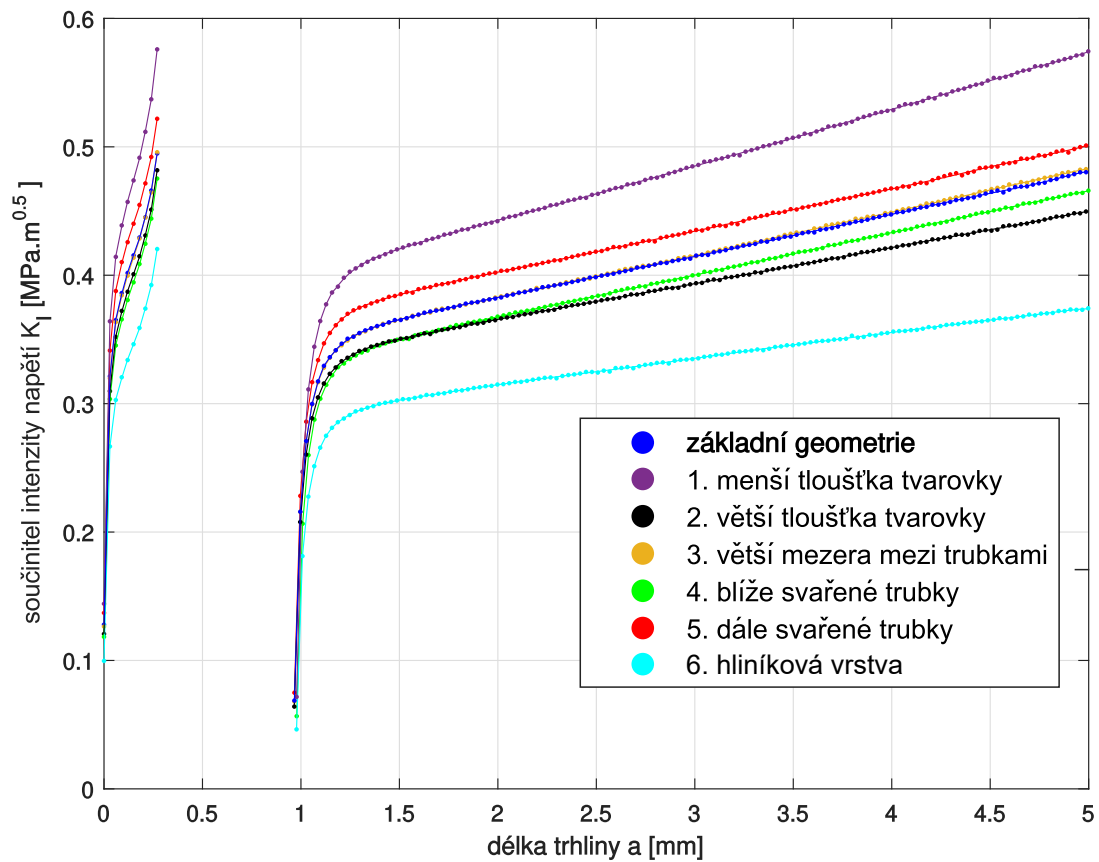


Obr. 5.1: Závislost součinitele intenzity napětí na délce trhliny pro základní geometrii elektrofúzního spoje pro  $\sigma_\theta = 4$  MPa

Graf je kvůli přítomnosti dutiny pro odporový drát, způsobující skokový nárůst délky trhliny, tvořen dvěma oblastmi. Z tohoto důvodu je nutné nahlížet na data odděleně a nelze je proložit jednou křivkou.

Z počátku hodnoty  $K_I$  prudce rostou, což je způsobeno koncentrací napětí mezi vrubem a dutinou. Když se trhlina spojí s dutinou, dojde ke skokovému nárůstu její délky, čemuž odpovídá skok na obr. 5.1. Spojením trhliny a dutiny dojde k přerušení šíření trhliny na dobu nutnou k její opětovné iniciaci z povrchu dutiny.

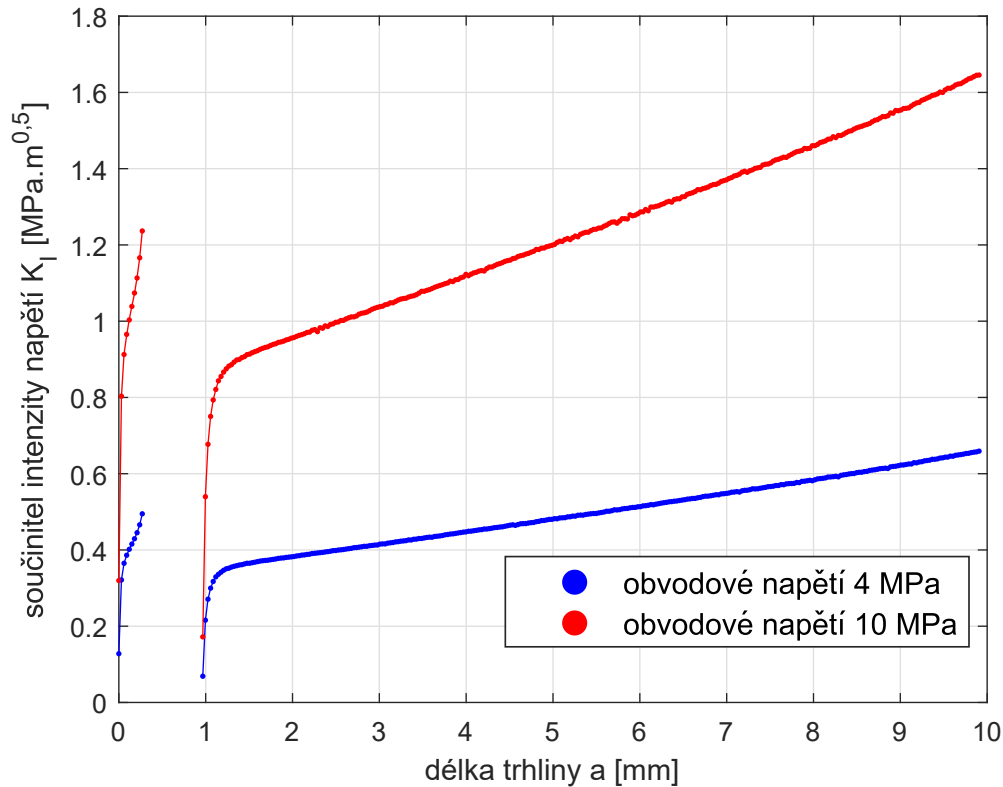
Pro popsání vlivu geometrie na hodnoty součinitele intenzity napětí bylo uvažováno 6 modifikovaných modelů, popsaných v kapitole 4.1. Srovnání průběhů  $K_I$  je na obr. 5.2. Průběhy jsou vykresleny do délky trhliny 5 mm z důvodu přehlednějšího zobrazení oblasti před dutinou odporového drátu.



Obr. 5.2: Závislost součinitele intenzity napětí na délce trhliny pro základní geometrii a modifikované modely elektrotvarovky a pracovní konfigurace pro  $\sigma_\theta = 4$  MPa

Zatímco vliv délky zasunutí trubek (modifikace č. 3) je téměř zanedbatelný, vliv tloušťky stěn elektrotvarovky (modifikace č. 1, 2) je značný. Především použití modelu s menší tloušťkou stěny tvarovky významně ovlivní  $K_I$  v nepříznivém smyslu. Změna svařovací délky, respektive délky střední studené zóny (modifikace č. 4, 5) mění místo iniciace trhliny a tím i hodnoty součinitele intenzity napětí. Využití hliníkové vrstvy (modifikace č. 6) představuje významné snížení  $K_I$  při stejné geometrii tvarovky a pracovní konfiguraci.

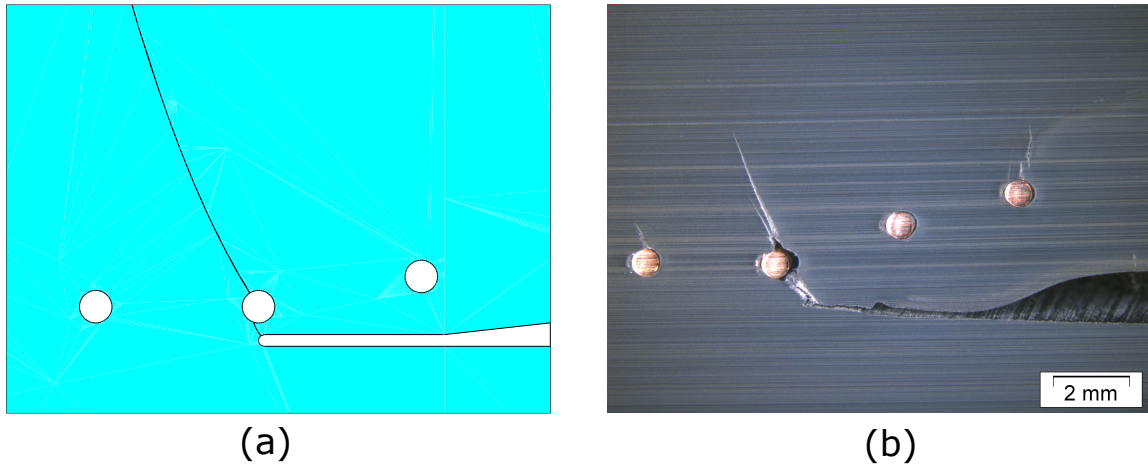
Výpočty byly provedeny pro hodnoty obvodového napětí 4 a 10 MPa. Srovnání průběhů pro tyto hodnoty je zobrazeno na obr. 5.3. Výsledky potvrzují, že při rostoucí hodnotě působícího vnitřního tlaku významně roste hodnota součinitele intenzity napětí.



Obr. 5.3: Závislost součinitele intenzity napětí na délce trhliny pro základní geometrii pro  $\sigma_\theta = 4$  MPa a  $\sigma_\theta = 10$  MPa

## 5.2 Trajektorie trhliny

V průběhu simulace byl v každém kroku vypočten úhel šíření trhliny pomocí kritéria MTS. Následující přírůstek byl poté vytvořen pod tímto úhlem. Trajektorie trhliny směřuje nejprve z vrubu k dutině odporového drátu, po jejím spojení se dále šíří z místa s maximálním prvním hlavním napětím. Při šíření lze pozorovat postupné stáčení trajektorie do radiálního směru. Na obr. 5.4 je zobrazeno porovnání trajektorie trhliny simulované numerickým modelováním a trajektorie při laboratorním testu. Jejich podobnost dokazuje, že výsledky získané numerickým modelováním lze považovat za věrohodné.



Obr. 5.4: Trajektorie trhliny a) simulovaná b) z laboratorního testování [12]

### 5.3 Životnost

Ze získaných hodnot součinitele intenzity napětí lze odhadnout životnost spoje. Při uvažování dvou oddělených oblastí je nutné integrovat každý interval (vrub – dutina a následné šíření z dutiny) samostatně. Celkový odhad životnosti se určí prostým součtem jednotlivých částí. Výpočet vychází ze vzorce popsaného v kapitole 2.10, pro přehlednost je vzorec znovu uveden v upravené formě pro uvažovaný model:

$$t_f = \int_{a_{01}}^{a_{f1}} \frac{da}{A \cdot [K_I(p_{int}, d, s, a)]^m} + \int_{a_{02}}^{a_{f2}} \frac{da}{A \cdot [K_I(p_{int}, d, s, a)]^m}, \quad (5.1)$$

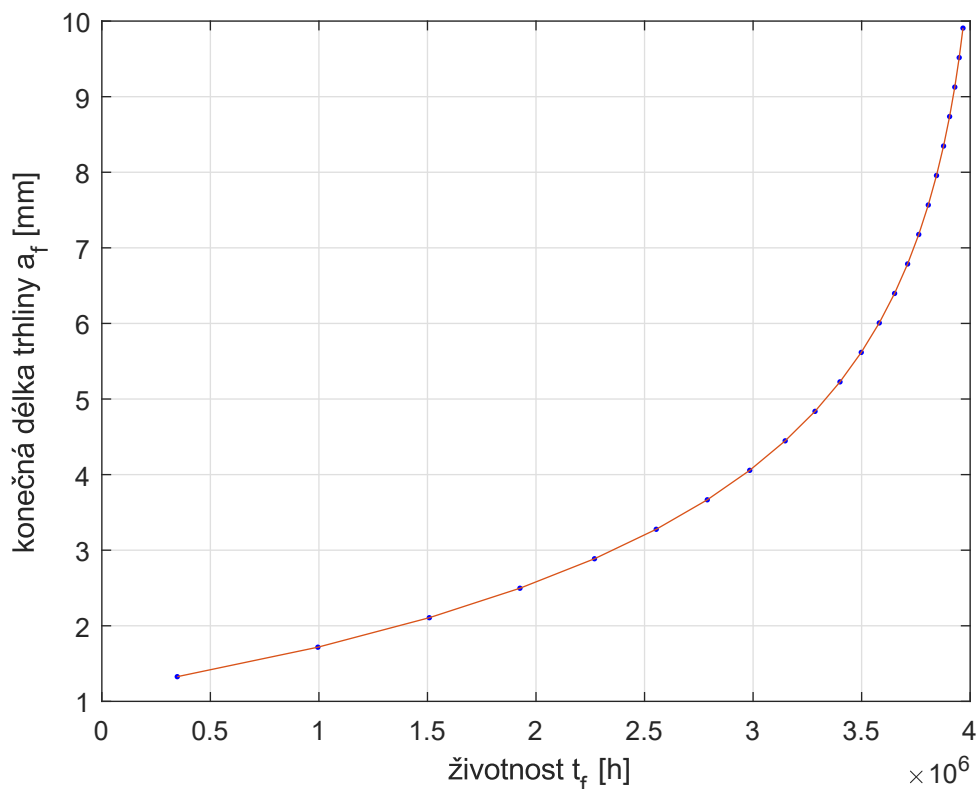
kde  $a_{01}$  pro oblast před dutinou, respektive  $a_{02}$  za dutinou, představují počáteční délku trhliny s uvažovanou velikostí 0,21 mm. Tato hodnota představuje počáteční defekt, ze kterého by se ve skutečném spoji trhlina šířila. Velikosti defektů se pohybují v rozmezí 0,1 – 0,4 mm [32]. Konečná délka trhliny pro oblast před dutinou je označena  $a_{f1}$  a má hodnotou délky trhliny při posledním kroku před spojením s dutinou drátu. Konečná délka trhliny pro šíření za dutinou má označení  $a_{f2}$ .

Jelikož je výpočet životnosti na délce  $a_{f2}$  závislý, musí její hodnota být vhodně zvolena. Na obr. 5.5 lze pozorovat, že s narůstající délkou trhliny klesá její vliv na životnost a narůstá rychlost šíření. Pro délku trhliny větší než 10 mm lze již životnost považovat za ustálenou. Odhady životnosti proto byly provedeny pro konečnou délku trhliny  $\approx 10$  mm. Pro oblast před dutinou drátu byly hodnoty  $K_I$  proloženy polynomem 7.stupně, v oblasti za dutinou polynomem 12. stupně.

Uvažované materiálové parametry popisující rychlost šíření trhliny v materiálu PE100-RC jsou [11]:

$$A = 9,2452 \cdot 10^{-8}$$

$$m = 6,2793.$$



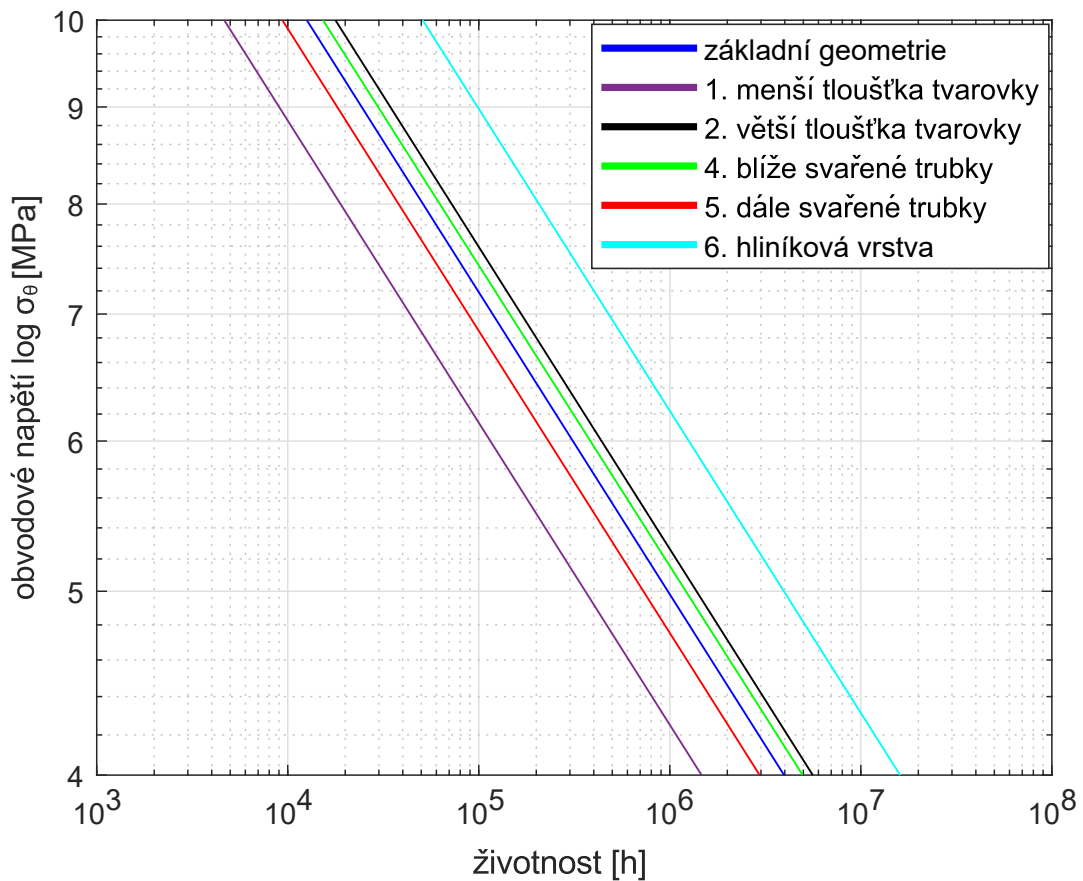
Obr. 5.5: Závislost životnosti na konečné délce trhliny pro základní geometrii a obvodové napětí 4 MPa

Výsledné životnosti odpovídají průběhům součinitele intenzity napětí. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1 a průběh zobrazen na obr. 5.6. Z důvodu zanedbatelného vlivu větší vzdálenosti zasunutých trubek (modifikace č. 3) životnost tohoto modelu nebyla vykreslena. Lze pozorovat významný vliv velikosti obvodového napětí na životnosti spoje, zatímco při 4 MPa dochází k výraznému prodloužení či zkrácení životnosti pro jednotlivé modifikace, zatížení 10 MPa sice zachovává jejich poměrové rozdíly, výrazně však zkracuje životnost v každé uvažované modifikaci. Jelikož výpočet životnosti zahrnuje pouze oblast stabilního šíření trhliny, nejsou uvažovány dvě doby iniciace, které tvoří významnou část doby životnosti. Výpočet však představuje konzervativní výsledek celkové životnosti.



Tab. 5.1: Životnosti základního modelu a uvažovaných modifikací

Model	$t_f$ pro $\sigma_\theta = 4$ MPa [h]	$t_f$ pro $\sigma_\theta = 10$ MPa [h]
Základní geometrie	3 965 402	12 587
Menší tloušťka	1 466 987	4 653
Větší tloušťka	5 603 419	17 770
Větší vzdálenost trubek	3 906 026	12 398
Bliže svařené trubky	4 962 241	15 293
Dále svařené trubky	2 953 745	9 373
Hliníková vrstva	16 064 154	50 886



Obr. 5.6: Životnost pro uvažované konfigurace a dané hodnoty obvodového napětí

## Závěr

Tato práce je věnována popisu šíření trhliny pomocí součinitele intenzity napětí, predikci trajektorie trhliny a odhadu životnosti elektrotvarovky pro spojování polymerních trubek. V rešeršní části bylo představeno využití polymerních trubek, materiály, ze kterých se vyrábí, a metody jejich spojování. Přiblížena byla také lomová mechanika, jejíž parametry jsou využity při řešení problému modelování šíření trhliny.

Tímto problémem se zabývala druhá část práce, kde bylo popsáno vytvoření numerického modelu pro simulaci šíření trhliny pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS. Šíření bylo prováděno s daným přírůstkem 0,03 mm a směr trajektorie byl v každém kroku určen kritériem maximálního tangenciálního napětí MTS. Výsledná trajektorie byla porovnána se snímkem z laboratorního testování, kde byla ukázána dobrá shoda. Při této simulaci byly zaznamenávány hodnoty součinitele intenzity napětí, jehož závislost na konečné délce trhliny byla hlavní náplní praktické části této práce. Výpočty byly prováděny pro hodnoty obvodového napětí 4 a 10 MPa, jejichž rozsah pokrývá aplikované zatížení při laboratorních zkouškách.

Pro zjištění vlivu geometrických parametrů či pracovní konfigurace na průběh součinitele intenzity napětí  $K_I$  bylo vytvořeno 6 modifikovaných modelů, pro které byl proveden identický výpočet simulující šíření trhliny. Následně byly hodnoty porovnány a byl vyhodnocen vliv dané modifikace.

Pro odhad životnosti byla zvolena konečná délka trhliny  $\approx 10$  mm, která je dostatečně velká pro prohlášení, že její navyšování by nemělo významný vliv na životnost a docházelo by k nepotřebnému navyšování strojového času výpočtu. Životnosti byly určeny pro obvodové napětí 4 a 10 MPa a vyneseny v logaritmickém měřítku. Pro reprezentaci životnosti v celém intervalu hodnot obvodového napětí jsou životnosti pro 4 a 10 MPa lineárně proloženy. Tímto bylo vytvořeno srovnání životností uvažovaných modelů a byly diskutovány vlivy modifikací a aplikovaného zatížení.

Menší tloušťka stěny tvarovky a větší středová studená zóna mezi trubkami negativně ovlivňují pevnost spoje,  $K_I$  dosahuje vyšších hodnot a zkracuje se životnost. Při větší vzdálenosti zasunutých trubek nedochází k téměř žádné změně hodnot součinitele intenzity napětí. Negativní vliv se projevuje až v pokročilém stádiu šíření trhliny. Model tvarovky s větší tloušťkou stěny a model uvažující blíže svařené trubky (a tedy kratší středovou studenou zónu) mají při začátku šíření trhliny stejně pozitivní vliv na hodnoty  $K_I$ . Během šíření ale dochází k prudšímu nárůstu hodnot v modelu blíže svařených trubek, což dokazují také odhady životností daných modifikací. Výrazně nejlepší vliv na hodnoty součinitele intenzity napětí má přidání hliníkové vrstvy na vnější povrch elektrotvarovky. Tato vrstva zajistí vyztužení tvarovky, což způsobí pokles napětí a hodnot součinitele intenzity napětí. Pokles těchto hodnot způsobí více než čtyřnásobný nárůst životnosti. Závěrem lze konstatovat, že cíle práce byly úspěšně splněny. K práci jsou přiložena makra v programovacím jazyce APDL, která byla využita pro numerické výpočty zde diskutovaných modelů. Změnu aplikovaného zatížení lze definovat změnou parametru  $\sigma_{hoop}$ . Dále je přiložen skript programu MATLAB obsahující výpočet odhadu životnosti.

# Literatura

- [1] ANDERSON, T. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. 3. vyd. Boca Raton: Taylor, 2005. 621 s. ISBN 08-493-1656-1.
- [2] BEECH, S., FERGUSON, C. a CLUTTON, E. Mechanisms of Slow Crack Growth in PE Pipe Grades. In: *Proceedings of Plastics Pipes XI*. Munich, 2001. Dostupné z: <http://www.plasticpipesconference.com/content/1/22/281/5c8666009753b.pdf>.
- [3] BOWMAN, J. A review of the electrofusion joining process for polyethylene pipe systems. *Polymer Engineering and Science*. 1997, roč. 37, s. 674–691.
- [4] ČSN EN ISO 1167-1. *Trubky, tvarovky a sestavy z termoplastů pro rozvod tekutin - Stanovení odolnosti vnitřnímu přetlaku - Část 1: Obecná metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [5] ČSN EN ISO 13479. *Trubky z polyolefinů pro rozvod tekutin - Stanovení odolnosti proti šíření trhliny - Metoda zkoušení pro pomalý růst trhliny na trubkách opatřených vrubem*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [6] ČSN EN ISO 9080. *Plastové rozvodné a ochranné potrubní systémy - Stanovení dlouhodobé hydrostatické pevnosti termoplastů ve formě trubek metodou extrapolace*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [7] DEBLIECK, A. C., VANBEEK, D. J. M., REMERIE, K. a WARD, I. M. Failure mechanisms in polyolefines: The role of crazing, shear yielding and the entanglement network. *Polymer*. 2011, roč. 52, s. 2979–2990. ISSN 0032-3861.
- [8] ERDOGAN, F. a SIH, G. C. On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear. *Journal of Basic Engineering*. 1963, roč. 85, s. 519–525.
- [9] *Fast Guide to Materials* [online]. [cit. 4.3.2021]. Dostupné z: <https://www.teppfa.eu/benefits-of-plastic-pipes-and-fittings/fast-guide-to-materials/>.
- [10] FLEISSNER, M. Experience with a full notch creep test in determining the stress crack performance of polyethylenes. *Polymer Engineering and Science*. 1998, roč. 38, s. 330–340.
- [11] FRANK, A., ARBEITER, F., BERGER, I., HUTAŘ, P., NÁHLÍK, L. et al. Fracture Mechanics Lifetime Prediction of Polyethylene Pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2018.
- [12] FRANK, A., BERGER, I., PINTER, G., NITSCHKE, D. a PETRY, D. Comparison of real and simulated failure times of electrofusion sockets made of polyethylene. *Joining Plastics*. 2017, s. 158–164.

- [13] FRANK, A., FREIMANN, W., PINTER, G. a W.R.LANG. A fracture mechanics concept for the accelerated characterization of creep crack growth in PE-HD pipe grades. *Engineering Fracture Mechanics*. 2009, roč. 76, s. 2780–2787. ISSN 0013-7944.
- [14] FRANK, A., HUTAŘ, P. a PINTER, G. Numerical Assessment of PE 80 and PE 100 Pipe Lifetime Based on Paris-Erdogan Equation. *Macromolecular Symposia*. 2012, roč. 311, s. 112–121. ISSN 10221360.
- [15] FRANK, A. a PINTER, G. Evaluation of the applicability of the cracked round bar test as standardized PE-pipe ranking tool. *Polymer Testing*. 2014, roč. 33, s. 161–171. ISSN 0142-9418.
- [16] FRANK, A., PINTER, G., KAPUR, M. a NEZBEDOVÁ, E. Comparison of accelerated tests for PE grades lifetime assessment. In: *Proceedings of Plastic Pipes XVI*. Barcelona, 2012. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/263927406\\_Comparison\\_of\\_accelerated\\_tests\\_for\\_PE\\_grades\\_lifetime\\_assessment/citations](https://www.researchgate.net/publication/263927406_Comparison_of_accelerated_tests_for_PE_grades_lifetime_assessment/citations).
- [17] GIRARD, D., CASTAGNET, S., GACOUGNOLLE, J. L. a HOSCHSTETTER, G. On the relevance of a notch creep test for the comprehension and prediction of slow crack growth in PVDF. *Polymer Testing*. 2007, roč. 26, s. 937–948. ISSN 0142-9418.
- [18] GOSZ, M. An interaction integral method for computation of T-stress along the fronts of general non-planar cracks in three-dimensions. In: *11th International Conference on Fracture 2005 (ICF11)*. Turin, 2005. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/239805141\\_An\\_interaction\\_integral\\_method\\_for\\_computation\\_of\\_T-stress\\_along\\_the\\_fronts\\_of\\_general\\_non-planar\\_cracks\\_in\\_three-dimensions](https://www.researchgate.net/publication/239805141_An_interaction_integral_method_for_computation_of_T-stress_along_the_fronts_of_general_non-planar_cracks_in_three-dimensions). ISBN 9781617820632.
- [19] HARRINGTON INDUSTRIAL PLASTICS. *Engineering handbook for industrial plastic piping systems*. [online]. Dostupné z: <https://www.hipco.com/wp-content/uploads/2019/02/Engineering-Handbook.pdf>.
- [20] HUTAŘ, P. a NÁHLÍK, L. *Lineárně elastická lomová mechanika – K-koncepce* [online]. [cit. 13.4.2021]. Dostupné z: <http://student.chytrak.cz/unava/09%20K-koncepce.pdf>.
- [21] HUTAŘ, P., ŠEVČÍK, M., NÁHLÍK, L., PINTER, G., FRANK, A. et al. A numerical methodology for lifetime estimation of HDPE pressure pipes. *Engineering Fracture Mechanics*. 2011, roč. 78, s. 3049–3058. ISSN 0013-7944.
- [22] CHAOUI, K., ALIMI, L. a AZZOUZ, S. Reliability index computation for HDPE pipe using critical stress intensity factor. In: *Proceedings of the 23rd French Mechanics Congress*. Lille, 2017. Dostupné z: <https://cfm2017.sciencesconf.org/135336/document>.

- [23] CHASIS, D. A. *Plastic Piping Systems*. 2. vyd. Industrial Press, 1988. 137 s. ISBN 978-0-939773-66-4.
- [24] CHUDNOVSKY, A., ZHOU, Z., ZHANG, H. a SEHANOBISH, K. Lifetime assessment of engineering thermoplastics. *International Journal of Engineering Science*. 2012, roč. 59, s. 108–139. ISSN 0020-7225.
- [25] ISO 16241:2005. *Notch tensile test to measure the resistance to slow crack growth of polyethylene materials for pipe and fitting products (PENT)*. Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
- [26] ISO 16770:2019. *Determination of environmental stress cracking (ESC) of polyethylene — Full-notch creep test (FNCT)*. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
- [27] ISO 18489:2015. *Polyethylene (PE) materials for piping systems — Determination of resistance to slow crack growth under cyclic loading — Cracked Round Bar test method*. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.
- [28] JANČÁŘ, J. a NEZBEDOVÁ, E. *Základy lomové mechaniky plastů*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Purkyňova 464/118, 612 00 Brno, 2007. 33 s. ISBN 978-80-214-3453-0.
- [29] KAWAKATSU, T. *Statistical Physics of Polymers: An Introduction*. 1. vyd. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. 216/222 s. ISBN 978-3-662-10024-0.
- [30] KRATOCHVILLA, T. R. U., MUSCHIK, H. a DRAGAUN, H. Experiences with modified test conditions for notch pipe testing. *Polymer Testing*. 2008, roč. 27, s. 158–160. ISSN 0142-9418.
- [31] KRISHNASWAMY, R. K. Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high-density polyethylene (HDPE) pipes. *Polymer*. 2005, roč. 46, č. 25, s. 11664–11672. ISSN 0032-3861.
- [32] LANG, R. W., STERN, A. a DOERNER, G. Applicability and limitations of current lifetime prediction models for thermoplastics pipes under internal pressure. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*. 1997, roč. 247, s. 131–145.
- [33] LU, X. a BROWN, N. A test for slow crack growth failure in polyethylene under a constant load. *Polymer Testing*. 1992, roč. 11, s. 309–319. ISSN 0142-9418.
- [34] MALÍKOVÁ, L., VESELÝ, V. a SEITL, S. Crack propagation direction in a mixed mode geometry estimated via multi-parameter fracture criteria. *International Journal of Fatigue*. 2016, roč. 89, s. 99–107. ISSN 0142-1123.
- [35] MIKULA, J. *Numerické modelování šíření trhlin v rámci platnosti LELM*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Ševčík, Ph.D.

- [36] *Modulus of elasticity and Poisson's coefficient of non-ferrous metals* [online]. [cit. 19.5.2021]. Dostupné z: <https://www.sonelastic.com/en/fundamentals/tables-of-materials-properties/non-ferrous-metals.html>.
- [37] *Montáž tvarovek* [online]. [cit. 17.3.2021]. Dostupné z: <https://www.aliaxis-ui.cz/tvarovky-na-tupo/montaz-tvarovek.html>.
- [38] MURAKAMI, Y. *Stress Intensity Factors Handbook: Volume 1*. 1. vyd. Oxford: Pergamon Press, 1987. ISBN 00-803-4809-2.
- [39] NAYYAR, M. L. *Piping Handbook*. 7. vyd. McGraw-Hill, 2000. 2483 s. ISBN 0-07-047106-1.
- [40] NEZBEDOVÁ, E., HUTAŘ, P., ZOUHAR, M., KNÉSL, Z., SADÍLEK, J. et al. The applicability of the Pennsylvania Notch Test for a new generation of PE pipe grades. *Polymer Testing*. 2013, roč. 32, s. 106–114. ISSN 0142-9418.
- [41] NIELSEN, L. E. a LANDEL, R. F. *Mechanical Properties of Polymers and Composites*. 2. vyd. CRC Press, 1993. 138 s. ISBN 9780824789640.
- [42] O'CONNOR, C. Polyethylene Pipeline Systems - Avoiding the Pitfalls of Fusion Welding. In: *Proceedings of the 7th Pipeline Technology Conference*. Hannover, 2012. Dostupné z: <https://www.pipeline-conference.com/abstracts/polyethylene-pipeline-systems-avoiding-pitfalls-fusion-welding>. ISSN 2510-6716.
- [43] PINTER, G., HAAGER, M. a LANG, R. W. Influence of nonylphenol–polyglycol–ether environments on the results of the full notch creep test. *Polymer Testing*. 2007, roč. 26, s. 700–710. ISSN 0142-9418.
- [44] *PLANE182 Element Description* [online]. [cit. 19.5.2021]. Dostupné z: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v211/en/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_PLANE182.html](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v211/en/ans_elem/Hlp_E_PLANE182.html).
- [45] PLASTIC PIPE INSTUTITE. *Handbook of Polyethylene Pipe: 2nd edition*. [online]. Dostupné z: <https://plasticpipe.org/publications/pe-handbook.html>.
- [46] PM ENGINEER. *Pipe joining methods study*. [online]. Dostupné z: [https://www.pmengineer.com/ext/resources/PME/Home/Files/PDFs/0208PME\\_Pipe\\_Joining\\_Methods\\_07.pdf](https://www.pmengineer.com/ext/resources/PME/Home/Files/PDFs/0208PME_Pipe_Joining_Methods_07.pdf).
- [47] PODUŠKA, J., HUTAŘ, P., BERGER, I., FRANK, A., DLHÝ, P. et al. Examining design changes potentially influencing the lifetime of electrofusion socket. In: *ANTEC® 2018 - Proceedings of the Technical Conference and Exhibition*. Orlando, 2018.
- [48] *Polyvinyl Chloride PVC* [online]. [cit. 4.3.2021]. Dostupné z: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/pvc.aspx>.

- [49] ROSE, L. J., CHANNELL, A. D., FRYE, C. J. a CAPACCIO, G. Slow crack growth in polyethylene: A novel predictive model based on the creep of craze fibrils. *Journal of Applied Polymer Science*. 1994, roč. 54, s. 2119–2124. ISSN 0021-8995.
- [50] RU, Z. L., ZHAO, H. a YIN, S. Evaluation of mixed-mode stress intensity factors by extended finite element method. *Journal of central south university*. 2013, roč. 20, s. 1420–1425. ISSN 2095-2899.
- [51] SCHILLING, M., NIEBERGALL, U. a BÖHNING, M. Full notch creep test (FNCT) of PE-HD – Characterization and differentiation of brittle and ductile fracture behavior during environmental stress cracking (ESC). *Polymer Testing*. 2017, roč. 64, s. 156–166. ISSN 0142-9418.
- [52] SHI, J., ZHENG, J., GUO, W. a QIN, Y. Defects classification and failure modes of electrofusion joint for connecting polyethylene pipes. *Journal of Applied Polymer Science*. [online]. 2012, roč. 124, s. 4070–4080. Dostupné z: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/app.35013?saml\\_referrer](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/app.35013?saml_referrer).
- [53] *Socket Fusion* [online]. [cit. 17.3.2021]. Dostupné z: [https://plasticpipe.org/municipal\\_pipe/advisory/connections/fusion-socket.html](https://plasticpipe.org/municipal_pipe/advisory/connections/fusion-socket.html).
- [54] *Solvent Welding* [online]. [cit. 16.3.2021]. Dostupné z: [https://www.plasticpipeshop.co.uk/Solvent-Welding\\_ep\\_93-1.html](https://www.plasticpipeshop.co.uk/Solvent-Welding_ep_93-1.html).
- [55] STOKES, V. K. Joining methods for plastics and plastic composites: An overview. *Polymer Engineering and Science*. 1989, roč. 29, s. 1310–1324.
- [56] *The complete CPVC solvent cement guide* [online]. [cit. 16.3.2021]. Dostupné z: <https://www.corzan.com/en-us/the-complete-solvent-cement-guide>.
- [57] THE EUROPEAN PLASTIC PIPES AND FITTINGS ASSOCIATION. *100 Year Service Life of Polypropylene And Polyethylene Gravity Sewer Pipes*. [online]. Dostupné z: <https://plasticpipe.org/pdf/tepfpa-european-plastic-pipe-fittings-association.pdf>.
- [58] *Threads Used For Tube Fittings* [online]. [cit. 24.3.2021]. Dostupné z: <http://instrumentationtubing.blogspot.com/2012/12/140-threads-used-for-tube-fittings.html>.
- [59] TROUGHTON, M. J. *Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide*. 2. vyd. William Andrew, 2008. 563 s. ISBN 9780815515814.
- [60] VLK, M. a FLORIÁN, Z. *Mezní Stavby a spolehlivost* [online]. Brno, 2007 [cit. 13.4.2021]. 185 s. Dostupné z: <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf>.

- [61] WEDGNER, A. Why Replace Existing Pipelines When They Can Be Rehabilitated Using Polyethylene Pipes and Fittings. In: *Proceedings of the 2014 Water New Zealand Annual Conference and Expo*. Hamilton, 2014. Dostupné z: [https://www.waternz.org.nz/Article?Action=View&Article\\_id=91](https://www.waternz.org.nz/Article?Action=View&Article_id=91).
- [62] WILLOUGHBY, D. A. *Plastic piping handbook*. 1. vyd. McGraw-Hill, 2002. 359 s. ISBN 978-00-714-5030-0.
- [63] YANG, B. *Stress, Strain, and Structural Dynamics: An Interactive Handbook of Formulas, Solutions, and MATLAB Toolboxes*. Academic Press, 2005. 961 s. ISBN 0127877673.



## Seznam symbolů a zkratek

<i>A</i>	[s.MPa.m <sup>1/2</sup> ]	materiálový parametr Paris–Erdoganovy rovnice
<i>APDL</i>		Ansys Parametric Design Language
<i>COD</i>	[mm]	crack opening displacement
<i>CPVC</i>		chlorovaný polyvinylchlorid
<i>CRB</i>		Cracked Round Bar (test)
<i>CTD</i>		crack tip displacement
<i>D</i>	[mm]	vnější průměr trubky
<i>E</i>	[MPa]	Youngův modul (modul pružnosti v tahu)
<i>EPLM</i>		elasto-plastická lomová mechanika
<i>ESC</i>		environmental stress cracking
<i>F<sub>max,min</sub></i>	[N]	maximální a minimální zatížení v zatěžovacím cyklu
<i>FNCT</i>		Full Notch Creep Test
<i>G</i>	[N/m]	hnací síla trhliny, rychlost uvolňování energie
<i>G<sub>c</sub></i>	[N/m]	lomová houževnatost energetického přístupu LELM
<i>HDPE</i>		high density polyethylene
<i>K</i>	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	součinitel intenzity napětí
<i>K<sub>I</sub>, K<sub>II</sub>, K<sub>III</sub></i>	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	součinitel intenzity napětí pro mód I, II, III
<i>K<sub>I</sub><sup>*</sup></i>	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	součinitel intenzity napětí pro bod v okolí čela trhliny
<i>K<sub>I,int</sub></i>	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	souč. int. napětí pro trubku s vnitřním přetlakem
<i>K<sub>I,max</sub></i>	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	maximální hodnota souč. int. napětí v zátěžném cyklu
<i>K<sub>I,th</sub></i>	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	prahová hodnota součinitele intenzity napětí
<i>K<sub>c</sub></i>	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	lomová houževnatost
<i>LDPE</i>		low density polyethylene
<i>LELM</i>		lineárně elastická lomová mechanika
<i>L<sub>s</sub></i>	[mm]	délka středové studené zóny
<i>L<sub>t</sub></i>	[mm]	délka elektrotvarovky
<i>MDPE</i>		medium density polyethylene
<i>MKP</i>		metoda konečných prvků
<i>MTS</i>		maximum tangential stress
<i>NPT</i>		Notched Pipe Test
<i>PB</i>		polybutylen
<i>PE</i>		polyethylen
<i>PENT</i>		Pennsylvania Edge Notch Tensile (test)
<i>PE-X</i>		sítovaný polyethylen
<i>PP</i>		polypropylen
<i>PVC</i>		polyvinylchlorid
<i>R</i>	[-]	napětový poměr
<i>RC</i>		resistant to cracking
<i>RCP</i>		rapid crack propagation
<i>SCG</i>		slow crack growth

$SDR$		standard dimension ratio
$SED$		strain energy density
$SIF$		stress intensity factor
$W$	[J]	energie napjatosti
$Y$	[-]	tvarová funkce
$a$	[mm]	délka trhliny
$a_0$	[mm]	počáteční délka trhliny
$a_{01,2}$	[mm]	poč. délka trhliny pro oblast před a za dutinou drátu
$a_f$	[mm]	konečná délka trhliny
$a_{f1,2}$	[mm]	kon. délka trhliny pro oblast před a za dutinou drátu
$c$	[mm]	vzdálenost zasunutí trubek v elektrotvarovce
$da/dt$	[mm/s]	rychlost růstu trhliny
$h$	[mm]	tloušťka stěny elektrotvarovky
$h_{Al}$	[mm]	tloušťka hliníkové vrstvy
$m$	[-]	materiálový parametr Paris–Erdoganovy rovnice
$p_{ax}$	[MPa]	axiální tlak
$p_{int}$	[MPa]	vnitřní tlak
$r$	[mm]	přírůstek trhliny
$s$	[mm]	tloušťka stěny trubky
$t$	[s]	čas
$t_f$	[s]	životnost
$x, y$		souřadnice kartézského souřadného systému
$r, \theta$		souřadnice polárního souřadného systému
$\mu$	[-]	Poissonův poměr
$\sigma$	[MPa]	nominální napětí
$\sigma_{max,min}$	[MPa]	maximální a minimální napětí v zatěžovacím cyklu
$\sigma_r$	[MPa]	radiální napětí
$\sigma_\theta$	[MPa]	obvodové napětí
$\Delta\sigma_0$	[MPa]	rozkmit napětí při cyklickém zatěžování
$\tau_{r,\theta}$	[MPa]	smykové napětí
$\theta$	[rad]	úhel šíření

# Seznam obrázků

1.1	Průběhy napětí a deformace při creepu (a) a relaxaci napětí (b) [45] . . . . .	13
1.2	Schematické znázornění závislosti životnosti polymerní trubky na obvodovém napětí a příslušné typy porušení [24] . . . . .	14
1.3	Změna křivky životnosti polymerní trubky v závislosti na teplotě [57] . . . . .	14
1.4	Tvárné porušení polyethylenové trubky [24] . . . . .	15
1.5	Schéma krejzu v polyethylenu [49] . . . . .	16
1.6	Kvazi-křehké porušení polyethylenové trubky [22] . . . . .	16
1.7	Zobrazení testového vzorku pro zkoušku NPT [61] . . . . .	18
1.8	Zkušební těleso pro PENT zkoušku [33] . . . . .	19
1.9	Zkušební těleso pro FNCT zkoušku z (a) lisované desky (b) trubky [10] . . . . .	19
1.10	Zkušební těleso pro CRB zkoušku a schéma zatěžování [13] . . . . .	20
1.11	Schéma netěsnícího šroubového spoje [58] . . . . .	21
1.12	Schéma metody a průběh tlaku při svařování na tupo [55] . . . . .	22
1.13	Pracovní konfigurace elektrotvarovky a tlakových trubek [52] . . . . .	23
1.14	Fáze elektrofúzního svařovacího procesu a tvorba pevnosti spoje [3] . . . . .	24
1.15	Schematické zobrazení typů porušení elektrofúzního spoje [52] . . . . .	25
1.16	Nevhodné geometrické uspořádání elektrotvarovky a polymerní trubky [52] . . . . .	27
2.1	Zatěžovací módy trhliny [1] . . . . .	29
2.2	Extrapolace dat přímé metody pro mód zatěžování I [20] . . . . .	31
2.3	Polární a kartézský souřadný systém v kořeni trhliny a směr obvodového napětí v bodě ve vzdálenosti $r$ od počátku [63] . . . . .	32
2.4	Schematické zobrazení závislosti rychlosti růstu trhliny $da/dt$ na součiniteli intenzity napětí $K_I$ [21] . . . . .	34
4.1	Model geometrie elektrofúzního spoje s vyznačenými základními rozměry [47] . . . . .	36
4.2	Schematické znázornění uvažovaných modifikací . . . . .	37
4.3	2D prvek PLANE182 [44] . . . . .	38
4.4	(a) síť modelu elektrofúzního spoje (b) detail oblasti středové studené zóny (c) detail oblasti mezi vrubem a dutinou odporového drátu . . . . .	39
4.5	Schematické zobrazení aplikovaného zatížení a okrajových podmínek [47] . . . . .	40
4.6	Rozložení prvního hlavního napětí v oblasti iniciace trhliny . . . . .	40
4.7	Zobrazení šíření trhliny mezi vrubem a dutinou odporového drátu . . . . .	41
4.8	Hustota sítě v okolí kořene trhliny pro velikost prvku ESIZE a) 0,01 b) 0,05 c) 0,025 . . . . .	42
5.1	Závislost součinitele intenzity napětí na délce trhliny pro základní geometrii elektrofúzního spoje pro $\sigma_\theta = 4$ MPa . . . . .	44
5.2	Závislost součinitele intenzity napětí na délce trhliny pro základní geometrii a modifikované modely elektrotvarovky a pracovní konfigurace pro $\sigma_\theta = 4$ MPa . . . . .	45

5.3	Závislost součinitele intenzity napětí na délce trhliny pro základní geometrii pro $\sigma_\theta = 4$ MPa a $\sigma_\theta = 10$ MPa . . . . .	46
5.4	Trajektorie trhliny a) simulovaná b) z laboratorního testování [12] . . . . .	47
5.5	Závislost životnosti na konečné délce trhliny pro základní geometrii a obvodové napětí 4 MPa . . . . .	48
5.6	Životnost pro uvažované konfigurace a dané hodnoty obvodového napětí . .	49

## Seznam tabulek

4.1	Rozměry základního modelu . . . . .	37
4.2	Modifikované rozměry . . . . .	37
4.3	Materiálové charakteristiky pro HDPE a hliník . . . . .	38
4.4	Závislost součinitele intenzity napětí na velikosti prvku mapované oblasti pro první krok šíření trhliny při obvodovém napětí 4 MPa . . . . .	43
5.1	Životnosti základního modelu a uvažovaných modifikací . . . . .	49

## Seznam příloh

- Příloha 1 – tvarovka\_blizsvarene.inp
- Příloha 2 – tvarovka\_dalsvarene.inp
- Příloha 3 – tvarovka\_hlinikovavrstva.inp
- Příloha 4 – tvarovka\_mensitloustka.inp
- Příloha 5 – tvarovka\_vetsimezera.inp
- Příloha 6 – tvarovka\_vetsitloustka.inp
- Příloha 7 – tvarovka\_zakladni.inp
- Příloha 8 – zivotnosti.m