VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

POPIS PORUŠOVÁNÍ VÍCEVRSTVÝCH POLYMERNÍCH PROSTŘEDÍ

DESCRIPTION OF FAILURE OF THE MULTILAYER POLYMER STRUCTURE

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

AUTOR PRÁCE Ing. MICHAL ZOUHAR
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. PAVEL HUTAŘ, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2014

Klíčová slova

Lomová mechanika, bi-materiálové rozhraní, pomalý růst trhliny, kritéria stability, odhad životnosti

Keywords

Fracture mechanics, bi-material interface, slow crack growth, crack stability criteria, lifetime estimation

© Michal Zouhar, 2014

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně

a

Ústav fyziky materiálů
Akademie věd České republiky, v. v. i.
Brno

zouhar@ipm.cz
tel.: + 420 532 290 494

ISBN 80-214-XXX
ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD 5

2 LINEÁRNĚ ELASTICKÁ LOMOVÁ MECHANIKA 5

2.1 Vrchol trhliny nacházející se v homogenním materiálu v dostatečné vzdálenosti od materiálového rozhraní 7

2.2 Vrchol trhliny v blízkosti bi-materiálového rozhraní 7

2.3 Vrchol trhliny na materiálovém rozhraní 8

2.4 Trhlina po průchodu materiálovým rozhraním 10

3 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ PRÁCE 11

4 POSTUP ŘEŠENÍ A VYBRANÉ DOSAŽENÉ VÝSLEDKY 12

4.1 Porovnání nebezpečnosti existence vnější a vnitřní trhliny v polymerním potrubí 12

4.2 Trhlina s vrcholem na materiálovém rozhraní 15

4.2.1 Kritérium stability trhliny s vrcholem na materiálovém rozhraní 15

4.2.2 Vliv materiálového rozhraní na hodnotu součinitele intenzity napětí 16

4.2.3 Trhlina zakotvená na materiálovém rozhraní 17

4.3 Odhad životnosti vícevrstvého polymerního potrubí 20

5 ZÁVĚR 22

6 VYBRANÉ PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA 25

7 POUŽITÁ LITERATURA 25

8 CURRICULUM VITAE 29

9 ABSTRACT 31

1 ÚVOD

V současnosti jsou v technické praxi čím dál častěji používány vícefázové a složené materiály s cílem snížit výrobní náklady při zachování nebo zlepšení funkčních vlastností finálních výrobků. Příkladem může být kombinace dvou a více materiálů použitých jako ochranné vrstvy s odlišnými vlastnostmi od základního materiálu. Tím lze získat lepší mechanické vlastnosti, vyšší vodivost, odolnost proti otěru, chemickou a tepelnou odolnost základního materiálu [16, 30].

Studium vícevrstvých prostředí bude v této práci zaměřeno zejména na polymerní vrstevnaté kompozity. Příkladem vrstevnatých polymerních materiálů mohou být vícevrstvé polymerní trubky [9, 14, 43], kde použitím vnější a vnitřní ochranné vrstvy lze zlepšit mechanické vlastnosti a zejména odolnost proti poškození.

Abychom byli schopni predikovat životnost potrubí, a to buď v průběhu jeho provozu, nebo již při návrhu, používá se běžně tlakový test [5]. Jeho nevýhodou je extrémně dlouhá doba nutná pro testování, zejména u pokročilých polymerních materiálů. Proto byly vyvinuty zrychlené testy jako Pensylvania Endge-Notch Test (PENT) [20], Full Notch Creep Test (FNCT) [21] nebo Crack Round Bar test (CRB) [36]. Nevýhodou těchto testů je možnost posoudit životnost pouze kvalitativně, nikoli kvantitativně. V poslední době se používají data z těchto testů v kombinaci s numerickou simulací šíření creepové trhliny pro kvantitativní odhad životnosti [11, 37, III]. Právě využití creepových dat na stanovení životnosti polymerního potrubí bude obsahem i této práce. Potřebné zkrácené creepové experimenty je nutno provést pro všechny materiály, které vícevrstvý kompozit obsahuje. Charakteristické materiálové vlastnosti byly získány díky spolupráci s Polymer Institute Brno a Polymer Competence Centre Leoben.

Cílem předložené práce je studium porušování vícevrstvých polymerních materiálů z HDPE za pomocí numerických simulací na bázi metody konečných prvků s aplikací na vícevrstvé polymerní trubky. Tato studie je tedy zaměřena zejména na popis šíření creepové trhliny v blízkosti materiálového rozhraní a následný popis přechodu trhliny přes toto rozhraní. Vzhledem ke spektru provozního zatížení lze použít přístupy lineárně elastické lomové mechaniky (LELM) a na jejich základě stanovit tvar šířící se creepové trhliny, určit okamžik přechodu trhliny přes rozhraní dvou polymerních materiálů, stanovit podmínky vedoucí k nestabilnímu růstu trhliny a v neposlední řadě predikovat zbytkovou životnost vícevrstvých trubek. Problematice šíření trhliny v prostředí složeného z více polymerních fází, kterému je věnována tato práce, nebyla doposud věnována velká pozornost a není v literatuře plně popsán. Výsledky této práce budou mít platnost nejen pro konkrétní polymerní materiály uvedené v práci, ale uvedený postup lze zobecnit a aplikovat na další materiály s podobnými vlastnostmi.

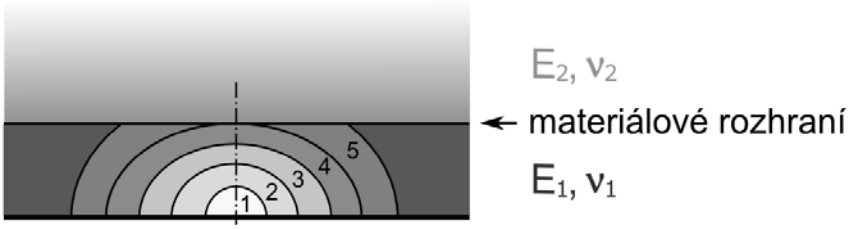
2 LINEÁRNĚ ELASTICKÁ LOMOVÁ MECHANIKA

Popisem pole napětí v okolí vrcholu trhliny a jejím chováním se zabývá lomová mechanika, která vychází z mechaniky kontinua a využívá klasickou teorii

pružnosti. V případě, že u tělesa předpokládáme platnost Hookova zákona, tedy lineárně-elastickou odezvu materiálu, lze pro popis pole napětí použít LELM [1, 26, 42]. Popis pomocí LELM je omezen malou plastickou deformací před čelem trhliny, resp. rozměr plastické zóny v okolí vrcholu trhliny musí být mnohem menší než délka trhliny nebo charakteristický rozměr tělesa. Jestliže velikost plastické zóny nesplňuje tuto podmínku, je nutné použít přístupu elasto-plastické lomové mechaniky (EPLM).

V případě trhliny s vrcholem na materiálovém rozhraní, je nutno tento přístup zobecnit a použít přístupu zobecněné lineárně elastické lomové mechaniky [22, 28, 32]. Pro zobecnění těchto postupů je nezbytné stanovení exponentu singularity napětí a hodnoty zobecněného součinitele intenzity napětí. Popisem pole napětí pro trhlinu s vrcholem na rozhraní dvou elastických materiálů se v minulosti zabývali např. [3, 4, 7, 8].

Při zatěžování vrstevnatého materiálu dochází typicky k postupnému šíření trhliny směrem z místa její iniciace v blízkosti povrchu směrem k materiálovému rozhraní, následnému růstu podél rozhraní a růstu přes materiálové rozhraní. Postupný růst trhliny, kdy vlivem existence materiálového rozhraní dochází ke změně jejího tvaru, je schematicky znázorněn na obr. č. 1.



Obr. 1 Vliv existence materiálového rozhraní na růst povrchové trhliny u vícevrstvého tělesa

V celém rozsahu práce se zabýváme specifickým zatěžováním polymerního materiálu, kdy dochází k porušení vlivem pomalého šíření creepové trhliny. V tomto speciálním případě je ve shodě s publikovanou literaturou zabývající se porušením polymerních materiálů využita lineárně elastická lomová mechanika k popisu chování trhliny [12, 19, 35, 39]. Proto se předpokládají jednotlivé materiály vícevrstvého tělesa elastické, izotropní, charakterizované elastickými materiálovými konstantami (modulem pružnosti v tahu E a Poissonovým číslem ν). Změnu materiálových vlastností přes rozhraní (elastic mismatch) lze charakterizovat poměrem modulů pružnosti jednotlivých materiálů E_1/E_2 za předpokladu totožného nebo velmi podobného Poissonova čísla jednotlivých materiálů. Vzhledem k existenci materiálového rozhraní je nutné popis růstu trhliny pomocí LELM rozdělit do několika fází:

a) trhlina s vrcholem v homogenním materiálu v dostatečné vzdálenosti od materiálového rozhraní

b) trhlina s vrcholem v blízkosti materiálového rozhraní

c) trhlina s vrcholem na materiálovém rozhraní

d) trhlina po průchodu materiálovým rozhraním.

Trhlina v materiálu (reprezentována jako geometrická nespojitost) je koncentrátor napětí, v jehož okolí má rozdělení napětí σ_{ij} vzhledem ke vzdálenosti od vrcholu trhliny r singulární charakter. Singulární rozdělení napětí vzhledem ke vzdálenosti r od koncentrátoru napětí lze napsat následovně:

$$\sigma_{ij} \approx \frac{1}{r^{p}} . \tag{1}$$

Exponent singularity napětí p může obecně nabývat komplexních hodnot, kde reálná část hodnot leží v intervalu (0;1). Pole napětí může být charakterizováno i větším počtem singulárních členů. Obecným singulárním koncentrátorem napětí může být studovaná trhlina s vrcholem na materiálovém rozhraní, V-vrub, bi-materiálový vrub, trhlina ležící v rozhraní materiálu atd. V případě vícevrstvých struktur závisí skutečná hodnota p a počet singularit na elastických konstantách obou materiálů, stejně jako na orientaci trhliny vzhledem k materiálovému rozhraní [3, 29]. Poznamenejme, že ostrá trhlina v homogenním tělese je speciálním případem obecného koncentrátoru napětí s exponentem singularity napětí p = 0,5 [44].

2.1 VRCHOL TRHLINY NACHÁZEJÍCÍ SE V HOMOGENNÍM MATERIÁLU V DOSTATEČNÉ VZDÁLENOSTI OD MATERIÁLOVÉHO ROZHRANÍ

V tomto případě lze na základě Williamsova rozvoje jednotlivé složky tenzoru napětí σ_{ij} v okolí vrcholu trhliny popsat následujícím vztahem [1]:

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right) f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta), \tag{2}$$

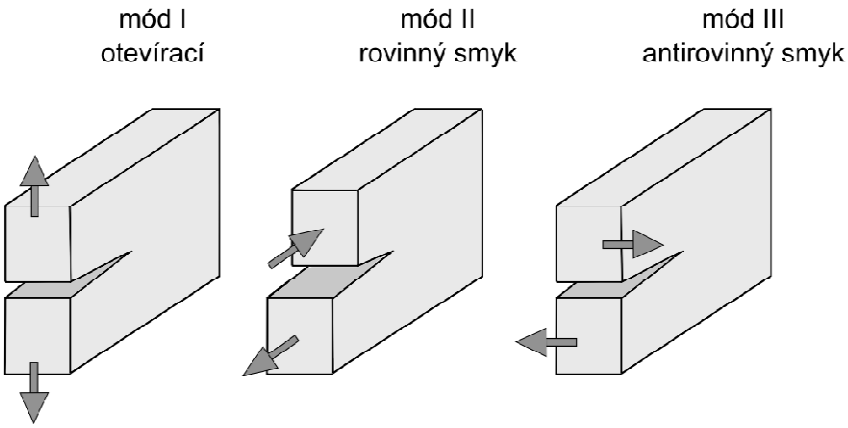
kde r, θ jsou polární souřadnice s počátkem ve vrcholu trhliny, K je tzv. součinitel intenzity napětí a f_{ij} je bezrozměrná funkce úhlu θ. Pro vyšší členy rozvoje parametr A_m představuje amplitudu a $g_{ij}^{(m)}$ je bezrozměrná funkce úhlu θ m-tého členu. V blízkosti vrcholu trhliny, pro $r \to 0$, je první člen rozvoje nejvýznamnější, a proto se často ostatní členy při popisu napjatosti v okolí kořene trhliny zanedbávají. Podle způsobu zatížení tělesa s trhlinou rozlišujeme tři základní, vzájemně nezávislé zatěžovací módy, kterým přísluší patřičné součinitele intenzity napětí K_I, K_{II}, K_{III} – otevírací (I), rovinný smyk (II) a antirovinný smyk (III), viz obr. 2.

2.2 VRCHOL TRHLINY V BLÍZKOSTI BI-MATERIÁLOVÉHO ROZHRANÍ

Jestliže se vrchol trhliny dostane do blízkosti materiálového rozhraní, dochází k ovlivnění napjatosti v okolí vrcholu trhliny skokovou změnou materiálových vlastností. Pro tento případ konfigurace trhliny lze vztah pro pole napětí formálně zapsat jako [2, 17]:

$$\sigma \approx \delta^{\lambda - \frac{1}{2}} r^{\frac{1}{2}}, \tag{3}$$

kde δ je vzdálenost vrcholu trhliny od materiálového rozhraní a λ je vlastní číslo. Pro případ, kdy je vrchol trhliny na materiálovém rozhraní, lze vlastní číslo λ určit z charakteristické rovnice, viz dále.



Obr. 2 Zatěžovací módy tělesa s trhlinou

2.3 VRCHOL TRHLINY NA MATERIÁLOVÉM ROZHRANÍ

Jestliže vrchol trhliny dosáhne materiálového rozhraní (p ≠ 0,5), hovoříme o této konfiguraci jako o obecném koncentrátoru napětí. Pro popis pole napětí u trhliny s vrcholem na materiálovém rozhraní nelze použít klasický přístup LELM, ale je možné tento přístup zobecnit [22, 28, 32]. Obecné koncentrátory napětí lze popsat pomocí zobecněné lomové mechaniky, např. parametrem zvaným zobecněný součinitel intenzity napětí *H*. Pole napětí v okolí trhliny obecně orientované pod úhlem ϕ vzhledem k materiálovému rozhraní a s vrcholem na tomto rozhraní lze popsat následujícím vztahem [33]:

$$\sigma_{ij} = \frac{H_1}{\sqrt{2\pi} r^{p_1}} f_{ij1}(\phi, \theta, p_1, \alpha_D, \beta_D) + \frac{H_2}{\sqrt{2\pi} r^{p_2}} f_{ij2}(\phi, \theta, p_2, \alpha_D, \beta_D). \tag{4}$$

Ze vztahu (4) vyplývá, že u obecného koncentrátoru napětí, resp. u trhliny obecně orientované k materiálovému rozhraní existují dva reálné exponenty singularity napětí p_1, p_2. Každému exponentu singularity napětí odpovídá zobecněný součinitel intenzity napětí H_1, resp. H_2, které v sobě zahrnují oba zatěžovací módy (otevírací a smykový). Ve vztahu (4) jsou r, θ polární souřadnice s počátkem ve vrcholu trhliny, f_{ij} je známá funkce, α_D, β_D jsou Dundursovy parametry [6], které jsou funkcí elastických konstant obou materiálů. Pokud se omezíme pouze na trhlinu orientovanou kolmo k tomuto rozhraní (ϕ = 90°) existuje pouze jeden exponent singularity napětí a pole napětí v okolí vrcholu trhliny má v tomto případě tvar [24]:

$$\sigma_{ij} = \frac{H}{\sqrt{2\pi} r^{p}} f_{ij}(\theta, p, \alpha, \beta), \tag{5}$$

kde α a β jsou kompozitní parametry, jejichž definice není shodná s parametry definovanými v [6], a význam ostatních členů je totožný s předchozím vztahem.

Hodnotu exponentu singularity napětí p lze určit ze známé hodnoty λ pomocí vztahu:

$$p = 1 - \lambda, \tag{6}$$

kde vlastní číslo λ získáme pro trhlinu orientovanou kolmo k materiálovému rozhraní řešením charakteristické rovnice ve tvaru [27, 32]:

$$\lambda^2\left(-4\alpha^2 + 4\alpha\beta\right) + 2\alpha^2 - 2\alpha\beta + 2\alpha - \beta + 1 + \left(-2\alpha^2 + 2\alpha\beta - 2\alpha + 2\beta\right)\cos(\lambda\pi) = 0\,, \tag{7}$$

kde α, β jsou kompozitní parametry:

$$\alpha = \frac{\frac{E_1}{E_2}(1+\nu_2) - (1+\nu_1)}{4}\,,\ \beta = \frac{E_1}{E_2} \text{ pro rovinnou napjatost a} \tag{8}$$

$$\alpha = \frac{\frac{E_1}{E_2}\cdot\frac{1+\nu_1}{1+\nu_2} - 1}{4(1-\nu_1)}\,,\ \beta = \frac{E_1}{E_2}\cdot\frac{1-\nu_2^2}{1-\nu_1^2} \text{ pro rovinnou deformaci.} \tag{9}$$

Vztah pro pole napětí v okolí vrcholu trhliny kolmé k rozhraní a s vrcholem ležícím na rozhraní dvou elastických materiálů (5) lze pro jednotlivé složky tenzoru napětí [10, 32] rozepsat následovně:

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= \lambda r^{\lambda-1}\frac{H}{\sqrt{2\pi}}[(2f_R - g_R)\cos(\lambda-1)\theta - (2f_I - g_I)\sin(\lambda-1)\theta - \\
&\quad - (\lambda-1)(f_R\cos(\lambda-3)\theta - f_I\sin(\lambda-3)\theta)] \\
\sigma_{yy} &= \lambda r^{\lambda-1}\frac{H}{\sqrt{2\pi}}[(2f_R + g_R)\cos(\lambda-1)\theta - (2f_I + g_I)\sin(\lambda-1)\theta + \\
&\quad + (\lambda-1)(f_R\cos(\lambda-3)\theta - f_I\sin(\lambda-3)\theta)] \\
\sigma_{xy} &= \lambda r^{\lambda-1}\frac{H}{\sqrt{2\pi}}[g_R\sin(\lambda-1)\theta + g_I\cos(\lambda-1)\theta + \\
&\quad + (\lambda-1)(f_R\sin(\lambda-3)\theta + f_I\cos(\lambda-3)\theta)]\,,
\end{aligned} \tag{10}$$

kde pro materiál M1 je:

$$f_R(\lambda) = \frac{\beta[1 + \alpha + (2\alpha\lambda - \alpha)\cos\lambda\pi]}{D(\lambda)} \tag{11}$$

$$f_I(\lambda) = \frac{-\beta[(2\alpha\lambda - \alpha)\sin\lambda\pi]}{D(\lambda)} \tag{12}$$

$$g_R(\lambda) = \frac{-\beta[\lambda + \alpha\lambda + (2\alpha\lambda^2 + \alpha\lambda - \alpha)\cos\lambda\pi + (1+\alpha)\cos 2\lambda\pi]}{D(\lambda)} \tag{13}$$

$$g_I(\lambda) = \frac{\beta\left[\left(2\alpha\lambda^2 + \alpha\lambda - \alpha\right)\sin\lambda\pi + \left(1+\alpha\right)\sin 2\lambda\pi\right]}{D(\lambda)} \tag{14}$$

$$D(\lambda) = 1 + 2\alpha + 2\alpha^2 - 2\left(\alpha + \alpha^2\right)\cos\lambda\pi - 4\alpha^2\lambda^2 \tag{15}$$

a pro materiál M2:

$$f_R = 1,\ f_I = g_I = 0 \tag{16}$$

$$g_R(\lambda) = \lambda - \cos\lambda\pi - \frac{\beta\left[\alpha + 2\lambda - \left(1 + 2\alpha - 4\alpha\lambda^2\right)\cos\lambda\pi + \left(1+\alpha\right)\cos 2\lambda\pi\right]}{D(\lambda)} \tag{17}$$

Z uvedených vztahů vyplývá, že pole napětí v okolí trhliny s vrcholem na materiálovém rozhraní je závislé na hodnotě exponentu singularity napětí p, na elastických materiálových konstantách obou materiálů a polárních souřadnicích. Toto pole lze pro zatěžující mód I charakterizovat pomocí jednoho parametru - zobecněného součinitele intenzity napětí H_I. Obdobně tomu je v případě trhliny v homogenním tělese, kde lze pole napětí popsat pomocí součinitele intenzity napětí K_I. Na tomto místě je nutné podotknout rozdílnost jednotek součinitele intenzity napětí K_I [MPa m$^{1/2}$] a zobecněného součinitele intenzity napětí H_I [MPa m^p]. Proto je přímá aplikace známých materiálových charakteristik obtížná a je třeba definovat vhodné kriterium stability trhliny [23]. Je zřejmé, že při aplikaci přístupu zobecněné lomové mechaniky na trhlinu v homogenním tělese, kde p = 0,5 hodnota zobecněného součinitele intenzity napětí přejde v hodnotu součinitele intenzity napětí, $K_I = H_I$.

2.4 TRHLINA PO PRŮCHODU MATERIÁLOVÝM ROZHRANÍM

Jestliže trhlina projde skrze materiálové rozhraní, lze následně použít již dříve uvedených vztahů pro popis pole napětí v okolí jejího vrcholu. Exponent singularity napětí p je roven 0,5 a při popisu pole napětí v okolí vrcholu trhliny lze postupovat analogicky jako v případě kapitoly 2.1.

3 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ PRÁCE

Rostoucí výskyt vícevrstvých konstrukcí si žádá nový komplexní popis mechanismu jejich porušení, který vezme do úvahy i šíření trhliny přes materiálové rozhraní. Tato problematika je nosným tématem předložené práce. Pro přesný odhad vlivu rozhraní je třeba studovat jak chování trhliny blížící se k materiálovému rozhraní, tak i samotné šíření trhliny přes bi-materiálové rozhraní. K těmto účelům je nezbytné zobecnění klasických přístupů lomové mechaniky pro popis obecného koncentrátoru napětí, jakým je trhlina na rozhraní dvou různých materiálů. Výsledky této obecné metodologie budou aplikovány na případ vícevrstvých polymerních trubek. Cíle práce lze shrnout do následujících bodů:

- S využitím metody konečných prvků navrhnout a vytvořit relevantní numerický model vícevrstvé struktury, který bude umožňovat stanovení součinitele intenzity napětí podél čela trhliny v homogenním materiálu a stanovení zobecněného součinitele intenzity napětí pro trhlinu s vrcholem na bimateriálovém rozhraní.
- Pro trhlinu šířící se z počátečního defektu na povrchu tělesa pomocí 3D numerického modelu odhadnout tvar šířící se trhliny a vliv existence materiálového rozhraní na hodnotu součinitele intenzity napětí, respektive na residuální zbytkovou životnost.
- Pro trhlinu s vrcholem, resp. čelem na rozhraní dvou polymerních materiálů definovat vhodné kriterium stability pro šíření trhliny přes rozhraní. Pro trhlinu zakotvenou na rozhraní popsat její další šíření podél rozhraní.
- Na základě navržené metodologie kvantifikovat vliv polymerního rozhraní na šíření trhliny. Definovat případy kdy je tento vliv významný, a vyslovit doporučení vedoucí ke zvýšení životnosti vrstevnatých polymerních materiálů (zejména v aplikaci na vícevrstvé polymerní trubky).

4 POSTUP ŘEŠENÍ A VYBRANÉ DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

V celé práci se předpokládá splnění podmínek použitelnosti lineárně elastické lomové mechaniky. Tato podmínka je pro polymery platná díky specifickému provoznímu zatížení polymerních potrubí a mechanismu poškození odpovídající pomalému šíření trhliny (SCG) [15, 18]. Materiály jednotlivých vrstev jsou předpokládány izotropní a homogenní. Předpokládá se ideální adheze mezi materiály jednotlivých vrstev a skoková změna materiálových vlastností při přechodu přes rozhraní dvou materiálů. Na povrchu vícevrstvého tělesa se předpokládá existence defektu typu trhlina, která se vlivem dalšího zatěžování šíří tímto tělesem. V případě trhliny s vrcholem na materiálovém rozhraní se v celé práci, pokud není uvedeno jinak, předpokládají líce trhliny orientované kolmo k materiálovému rozhraní.

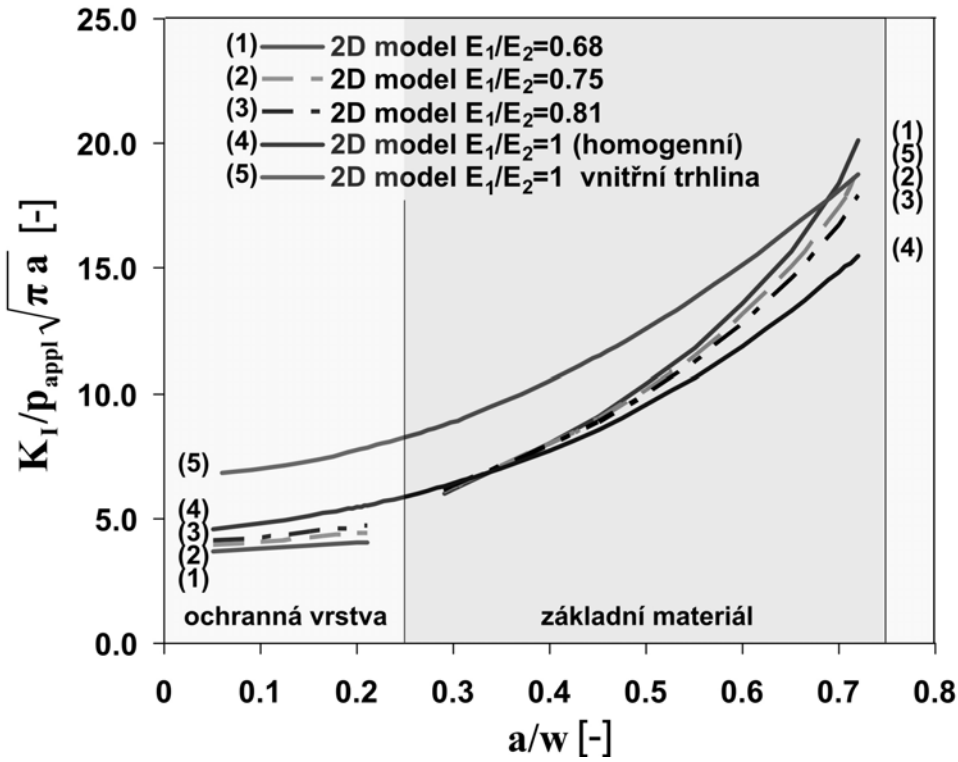
4.1 POROVNÁNÍ NEBEZPEČNOSTI EXISTENCE VNĚJŠÍ A VNITŘNÍ TRHLINY V POLYMERNÍM POTRUBÍ

V práci [V] byly pro třívrstvé polymerní potrubí (Wawin TSØ110 SDR 11: vnější průměr D = 110 mm, celková tloušťka stěny w = 10 mm, tloušťka vnitřní a vnější ochranné vrstvy t_1 = 2,5 mm, tloušťka základního materiálu t_2 = 5 mm) vytvořeny dvojdimenzionální numerické modely simulující šíření trhliny v jednotlivých vrstvách potrubí a vykreslení K-kalibrační křivky (závislost součinitele intenzity napětí K_I na hloubce trhliny a/w) pro dvě odlišné polohy trhlin (vnější, vnitřní). Lineárně elastické materiálové vlastnosti jednotlivých vrstev byly dány moduly pružnosti v tahu jednotlivých vrstev E_1 a E_2 a Poissonovými čísly ν_1 a ν_2 materiálu polymerního potrubí tak, jak jsou definovány v tab.1.

Tab. 1 Kombinace materiálových vlastností použitých pro numerické simulace

E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	$\nu_1 = \nu_2$ [-]	E_1/E_2 [-]
828	1213	0,35	0,68
910	1213	0,35	0,75
983	1213	0,35	0,81
1213	1213	0,35	1

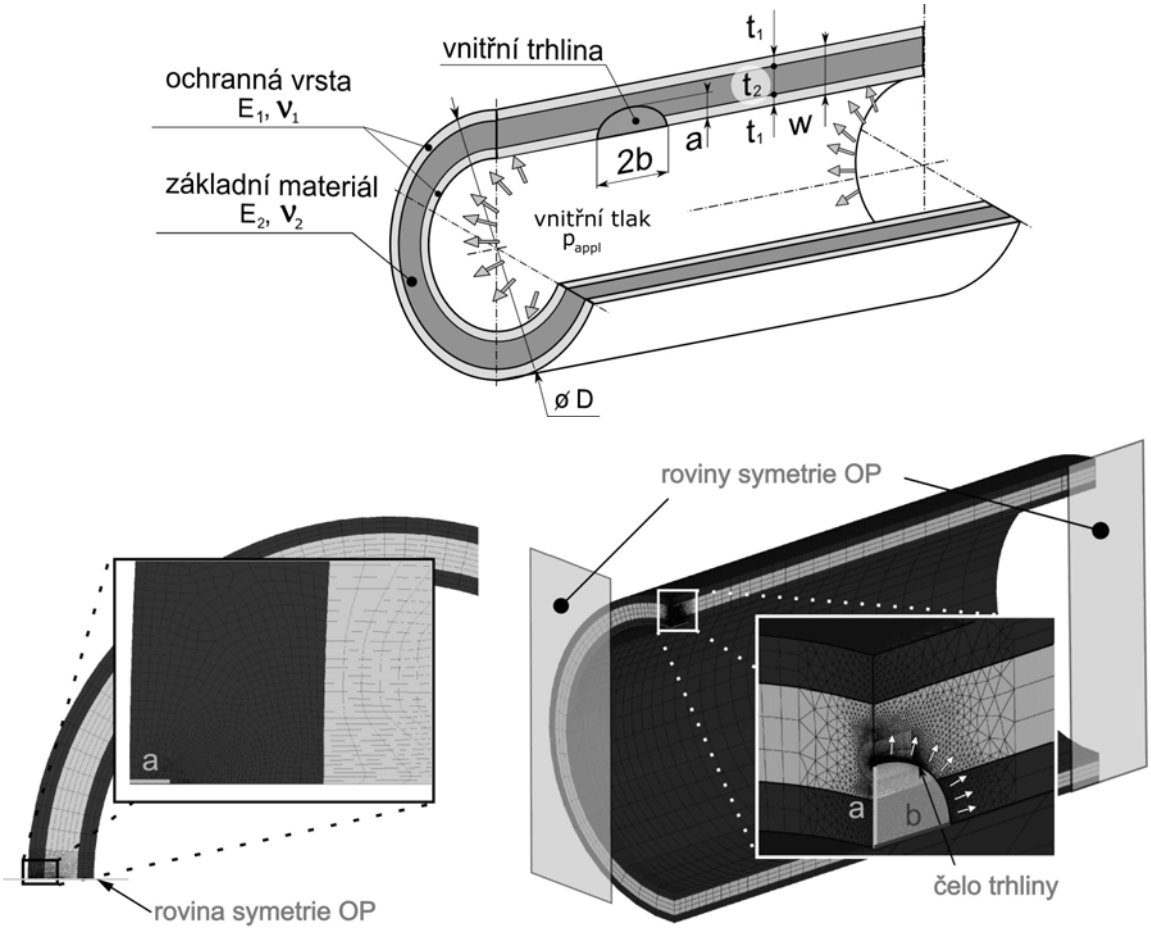
Z výsledků K-kalibračních křivek, viz obr. 3, získaných pomocí dvojdimenzionálního numerického modelu porušeného potrubí za podmínky rovinné deformace, viz obr. 4(a), lze vyvodit obecný závěr, že porušení na vnější straně potrubí je z pohledu životnosti méně nebezpečné, než existence stejně hluboké trhliny na vnitřní straně potrubí. Modelovaná trhlina v potrubí pomocí 2D numerického modelu za podmínky rovinné deformace předpokládá existenci trhliny hloubky a v celé délce potrubí.



Obr. 3 Hodnoty součinitele intenzity napětí v závislosti na hloubce trhliny pro vnější (1-4) a vnitřní (5) trhlinu u 2D numerického modelu potrubí

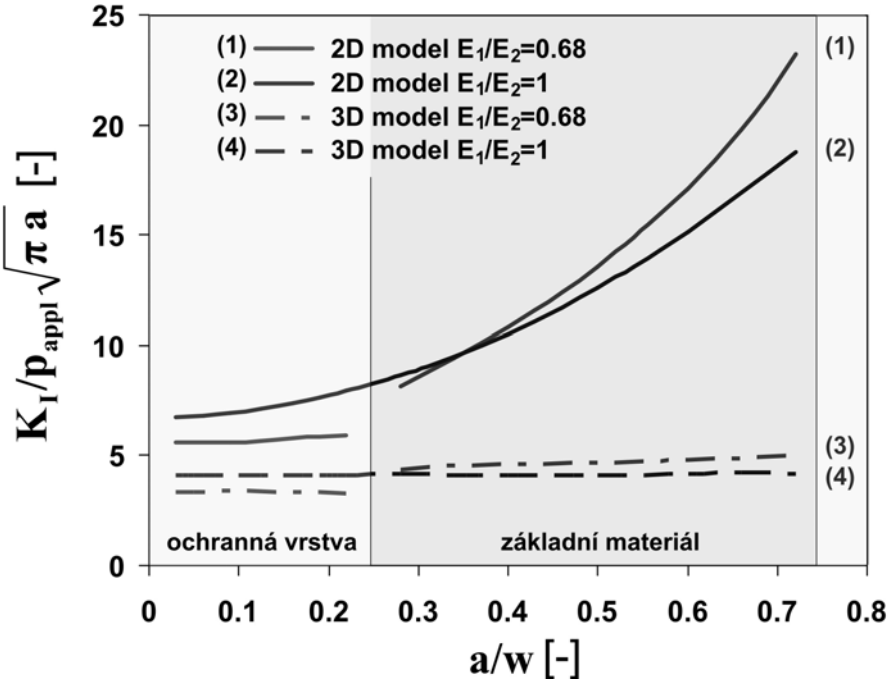
V pracích [V, VII] byl na základě 2D a 3D numerického modelu třívrstvého polymerního potrubí s vnitřní trhlinou studován růst trhliny z vnitřního povrchu potrubí směrem k materiálovému rozhraní a po průchodu materiálovým rozhraním. U 3D numerického modelu s poloeliptickou, axiálně orientovanou trhlinou byl pro každou hloubku trhliny předpokládán konstantní poměr eliptického čela trhliny *b/a* = 1,2. Dvojdimenzionální a prostorový numerický model potrubí, na kterém probíhaly simulace, je zobrazen na obr. 4.

K-kalibrační křivky pro homogenní trubku a pro třívrstvou trubku s materiálovými vlastnostmi odpovídající E_1/E_2 = 0,68 jsou zobrazeny na obr. 5. Výsledky získané na homogenní trubce vykazovaly dobrou shodu s řešením popsaném v handbooku pro hodnoty součinitele intenzity napětí [31], čímž byly výsledky získané pomocí metody konečných prvků a pomocí výše popsané metodiky ověřeny. Při porovnání výsledků homogenního a vícevrstvého potrubí získaných na 2D a 3D numerických modelech pro vnitřní trhlinu je patrné, že získané hodnoty součinitele intenzity napětí z 2D numerického modelu (předpoklad nekonečné trhliny v axiálním směru) jsou podstatně vyšší než hodnoty získané z 3D numerického modelu (předpoklad poloeliptické trhliny). Na základě tohoto výsledku je možno vyslovit závěr, že odhad životnosti pomocí hodnot součinitele intenzity napětí z 2D numerického modelu je silně konzervativní a pro přesnější odhad je nutné modelovat eliptickou trhlinu a využít výsledků z 3D numerického řešení.



(a) (b)

Obr. 4 Parametry numerického modelu a roviny symetrie u dvojdimenzionálního (a) a trojdimenzionálního (b) numerického modelu potrubí s trhlinou



Obr. 5 Porovnání výsledků získaných na 2D a 3D numerickém modelu potrubí s vnitřní trhlinou

4.2 TRHLINA S VRCHOLEM NA MATERIÁLOVÉM ROZHRANÍ

V případě trhliny s vrcholem na materiálovém rozhraní a kolmé k materiálovému rozhraní je nejdříve nutné stanovit kompozitní parametry (8) nebo (9) a následně pomocí vlastního čísla λ získat ze vztahu (6) hodnotu exponentu singularity napětí. U trhliny kolmé k materiálovému rozhraní existuje pro vlastního čísla λ a pro danou kombinaci E_1, E_2 a ν_1, ν_2 pouze jedno řešení vztahu (7). Při znalosti materiálových vlastností jednotlivých vrstev a exponentu singularity napětí z výše uvedeného postupu lze hodnotu zobecněného součinitele intenzity napětí pro trhlinu s vrcholem na materiálovém rozhraní nalézt pomocí přímé metody analogicky stejně jako v případě trhliny s vrcholem v homogenním materiálu. Pro trhlinu kolmou k materiálovému rozhraní zatíženou v módu I lze vztah (10) pro otevírací napětí ve směru šíření trhliny, tj. pro $\theta = 0$ napsat v následující podobě:

$$\sigma_{\theta\theta}(r,\theta=0)=\sigma_{yy}(x,y=0)=\frac{H_I}{\sqrt{2\pi}}(1-p)(2-p+g_r)r^{-p} \ , \qquad (18)$$

kde význam jednotlivých členů je uveden výše v textu. Porovnáním analytického a numerického řešení je získána závislost H_I^* na vzdálenosti od vrcholu trhliny r. Extrapolací hodnot H_I^* do vrcholu trhliny ($r \rightarrow 0$) s výjimkou bodů v blízkosti vrcholu trhliny obdržíme hodnotu zobecněného součinitele intenzity napětí H_I. Tuto hodnotu není vzhledem k odlišnosti jednotek možné porovnat s běžně měřenými lomovými materiálovými charakteristikami, např. prahovou hodnotou součinitele intenzity napětí K_{th} či lomovou houževnatostí K_{IC}. Ke stanovení podmínky dalšího růstu trhliny je nutné aplikovat kritérium stability trhliny pro trhlinu s vrcholem na materiálovém rozhraní.

4.2.1 Kritérium stability trhliny s vrcholem na materiálovém rozhraní

Na základě kritérií stability lze rozhodnout, zda se trhlina ve vícevrstvé konstrukci s vrcholem na materiálovém rozhraní bude dále šířit. V případě, kdy se trhlina šíří, umožňují kritéria rozhodnout, zda je její šíření stabilní či nestabilní, a dále lze při stabilním šíření pomocí výsledků z numerických metod predikovat směr dalšího růstu čela trhliny.

Pro trhlinu s vrcholem na materiálovém rozhraní lze formulovat kritéria stability na základě různých přístupů, např. kritérium založené na faktoru hustoty deformační energie [32], kritérium středního napětí [33] a kritérium otevření líců trhliny [1]. Všechna uvedená kritéria byla odvozena za předpokladu stejného mechanismu šíření trhliny v případě bi-materiálové tělesa s trhlinou i v případě trhliny v homogenním tělese, např. [25]. S ohledem na získané výsledky v práci [IX] bude pro další analýzy využito kritérium založené na faktoru hustoty deformační energie a to proto, že pomocí tohoto kritéria jsou získány konzervativnější výsledky v případě poměru $E_1/E_2 < 1$, což je prakticky nejzajímavější případ.

Kriterium založené na faktoru hustoty deformační energie

Pro trhlinu v homogenním materiálu byl faktor hustoty deformační energie odvozen Sihem [40, 41]. Za předpokladu, že v okamžiku šíření trhliny jsou si rovny kritické hodnoty zobecněného faktoru hustoty deformační energie jak v homogenním případě, tak i v případě trhliny s vrcholem na materiálovém rozhraní, lze mezi těmito veličinami nalézt vzájemnou relaci ve tvaru [32]:

$$H_{C\,SEDF} = \left(\frac{1-2\nu_2}{(1-p)^2\left(4(1-2\nu_2)+(g_r-p)^2\right)} \right)^{\frac{1}{2}} d^{p-\frac{1}{2}} K_C \,, \tag{19}$$

kde p je exponent singularity napětí, ν_2 je Poissonovo číslo materiálu M2, g_r je známá funkce, d je délkový parametr. Uvedeným vztahem lze nalézt vzájemnou relaci mezi kritickým lomovým parametrem u homogenní konstrukce a kritickým lomovým parametrem vícevrstvé konstrukce s trhlinou kolmou k materiálovému rozhraní a s vrcholem na rozhraní materiálů.

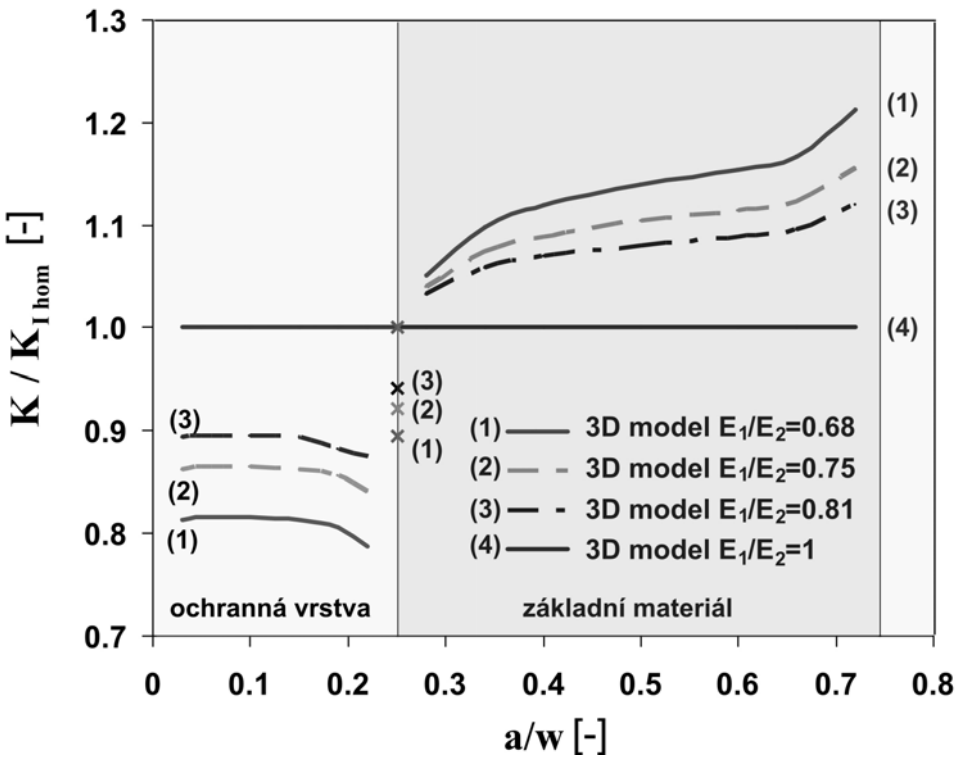
Z uvedeného kritéria stability lze vyjádřit tzv. efektivní součinitel intenzity napětí K_{eff}, kterým lze popsat pole napětí před čelem trhliny u trhliny s vrcholem na materiálovém rozhraní. Při použití kritéria stability založeném na faktoru hustoty deformační energie lze ze vztahu (19) vyjádřit vztah pro K_{eff} v následující podobě:

$$K_{eff} = \left(\frac{1-2\nu_2}{(1-p)^2\left(4(1-2\nu_2)+(g_r-p)^2\right)} \right)^{-\frac{1}{2}} d^{\frac{1}{2}-p} H_I \,. \tag{20}$$

Vzhledem k tomu, že efektivní součinitel intenzity napětí má jednotku MPa $m^{1/2}$, která je totožná s jednotkou součinitele intenzity napětí pro trhlinu v homogenním tělese, je možné hodnotu K_{eff} porovnat s materiálovou charakteristikou měřenou na homogenním tělese a stanovit, zda dojde či nedojde k růstu trhliny přes materiálové rozhraní.

4.2.2 Vliv materiálového rozhraní na hodnotu součinitele intenzity napětí

Práce [V, VII] se dále zabývaly vlivem existence materiálového rozhraní na hodnotu součinitele intenzity napětí pro vnitřní trhlinu s vrcholem před materiálovým rozhraním, na efektivní hodnotu součinitele intenzity napětí pro trhlinu na materiálovém rozhraní a na hodnotu součinitele intenzity napětí pro vrchol trhliny po průchodu materiálovým rozhraním. Chování trhliny v blízkosti materiálového rozhraní bylo sledováno pomocí 3D numerického modelu potrubí. Získané výsledky součinitele intenzity napětí (pro čelo trhliny v homogenním materiálu) a efektivních hodnot součinitele intenzity napětí (pro trhlinu s vrcholem na materiálovém rozhraní) byly vztaženy k hodnotě součinitele intenzity napětí pro totožnou hloubku trhliny u homogenní trubky K_{Ihom}. Získaná závislost K/K_{Ihom} na hloubce trhliny a/w je zobrazená na obr. 6. Prezentovaný graf ukazuje porovnání součinitelů intenzity napětí pro různé hloubky trhlin a poměry modulů pružnosti v tahu jednotlivých vrstev vícevrstvého potrubí (E_1/E_2) dle tabulky č. 1.



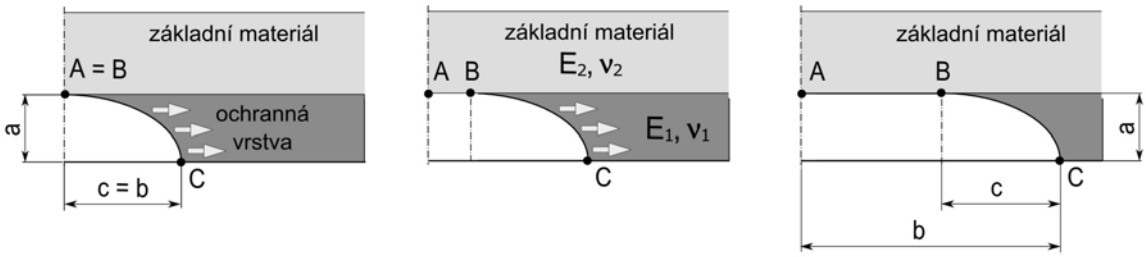
Obr. 6 Vliv materiálového rozhraní na hodnotu lomového parametru ve vrcholu trhliny, kde K na svislé ose reprezentuje K_I, respektive K_{eff}

Z výsledků je patrné, že při šíření trhliny v poddajnější ochranné vrstvě vzhledem k základnímu materiálu dosahuje součinitel intenzity napětí v porovnání s trhlinou v homogenním potrubí výrazně nižších hodnot. Rozdíl výsledků použitých materiálových vlastností vícevrstvého potrubí vzhledem k potrubí z homogenního materiálu dosahuje až 20%. Limitně mohou hodnoty součinitele intenzity napětí u vrcholu trhliny v těsné blízkosti materiálového rozhraní dosáhnout nulové hodnoty [30, 38]. Při materiálové konfiguraci jednotlivých vrstev potrubí $E_1/E_2 < 1$ lze sledovat pozitivní efekt vlivu materiálového rozhraní na hodnotu součinitele intenzity napětí pro trhliny do hloubky a/w = 0,25 (materiálové rozhraní).

4.2.3 Trhlina zakotvená na materiálovém rozhraní

Růst trhliny zakotvené na materiálovém rozhraní je schématicky znázorněn na obr. 7. Věnujme opět pozornost výsledkům na obr. 6, kde vypočítané hodnoty efektivního součinitele intenzity napětí K_{eff} pomocí kritéria odvozeného na základě faktoru hustoty deformační energie pro trhlinu s vrcholem na materiálovém rozhraní jsou nižší, než hodnota součinitele intenzity napětí pro homogenní těleso. Jestliže předpokládáme u obou materiálů totožný kritický lomový parametr K_C (prahovou hodnotu součinitele intenzity napětí nebo lomovou houževnatost), lze očekávat zpomalení růstu trhliny na materiálovém rozhraní do doby, než bude ve vrcholu trhliny dosaženo kritického lomového parametru K_C. Trhlina poroste podél rozhraní až do okamžiku, kdy hodnota efektivního součinitele intenzity napětí překročí K_C na

materiálovém rozhraní (oblast mezi body A a B, viz obr. 7), čímž trhlina proroste přes materiálové rozhraní [30, 34].



Obr. 7 Schématické zobrazení růstu trhliny zakotvené na materiálovém rozhraní

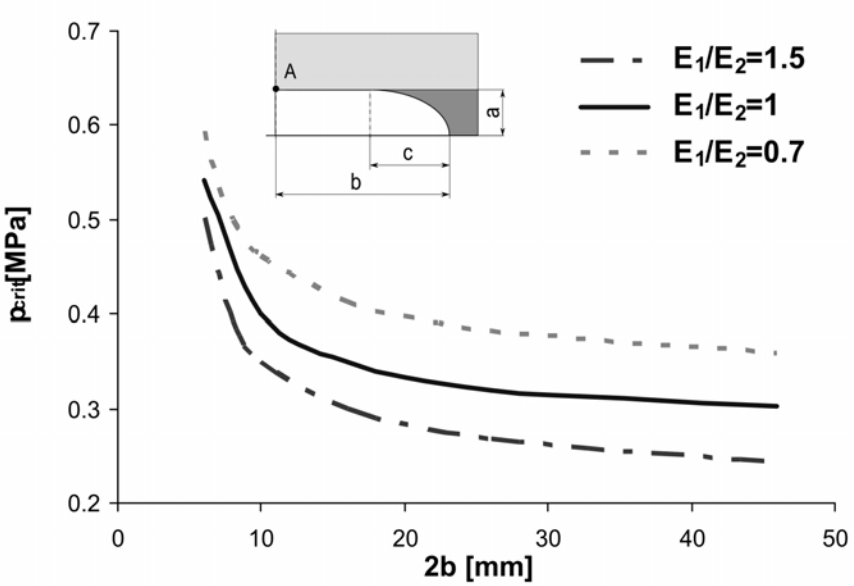
Studiu konfigurace trhliny zakotvené na materiálovém rozhraní a rostoucí podél materiálového rozhraní byla věnována pozornost v několika pracích [I, II, IV, VI, VIII, X]. V práci [VIII] byl pomocí numerického modelu třívrstvého potrubí s trhlinou studován vliv materiálových vlastností jednotlivých vrstev a velikosti creepové trhliny zakotvené na materiálovém rozhraní na hodnotu lomových parametrů. K popisu pole napětí v okolí čela trhliny ležícím na materiálovém rozhraní (bod A, respektive oblast mezi body A a B, obr. 7), bylo nejdříve nutné stanovit ze znalostí materiálových vlastností jednotlivých vrstev hodnotu exponentu singularity napětí p ze znalosti λ z charakteristické rovnice (7). Následně pomocí již známé hodnoty exponentu singularity napětí p bylo možno aplikovat přímou metodu k určení hodnoty zobecněného součinitele intenzity napětí H_I. Ke stanovení kritické hodnoty zobecněného součinitele intenzity napětí bylo použito kritérium stability založené na faktoru hustoty deformační energie, vztah (19). Rozměry třívrstvého potrubí odpovídaly již studované geometrické konfiguraci Wawin TS Ø110 SDR 11. Lineárně elastické materiálové vlastnosti základního materiálu a materiálu ochranné vrstvy byly: E_1 = 1213 MPa, E_1/E_2 = 0,7; 1; 1,5, $\nu_1 = \nu_2$ = 0,35, prahová hodnota součinitele intenzity napětí K_{th} = 0,2 MPa m$^{1/2}$ [13] a pevnosti v tahu σ_c = 30 MPa. Pomocí parametru $H_{C\ SEDF}$ a ze znalosti H_I z numerické analýzy potrubí s trhlinou zatíženého vnitřním tlakem p_{appl} a platnosti LELM je možno určit kritický tlak p_{crit} při kterém se trhlina bude šířit přes rozhraní následovně:

$$p_{crit} = \frac{H_C}{H_I\left(p_{appl}\right)} \cdot p_{appl}\,, \tag{21}$$

Výsledky p_{crit} určeného pomocí kritéria stability založeném na faktoru hustoty deformační energie v bodě A v závislosti na délce trhliny $2b$ pro různé varianty materiálových vlastností, je zobrazen na obr. 8.

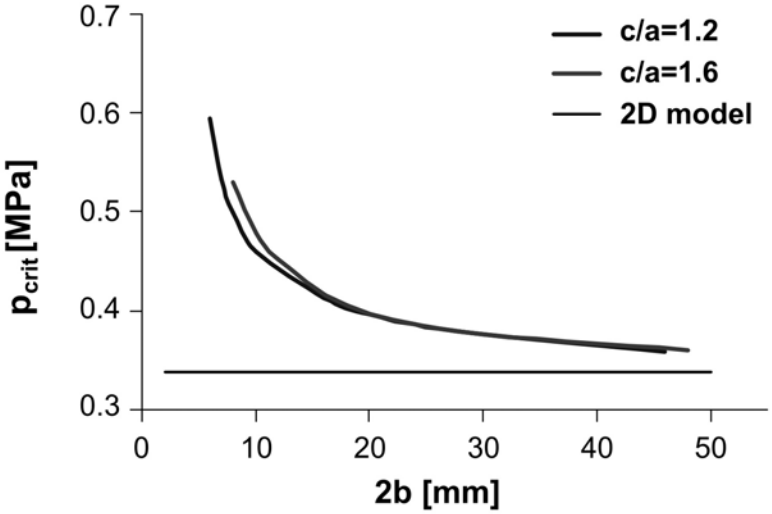
Výsledky závislosti kritického tlaku p_{crit} na délce trhliny $2b$ ukazují, že s rostoucí délkou $2b$ dochází k poklesu kritického tlaku nutného k růstu zakotvené trhliny přes materiálové rozhraní. U potrubí s trhlinou, kde pro moduly pružnosti jednotlivých vrstev platí $E_1/E_2 < 1$, je patrný pozitivní efekt existence materiálového rozhraní - nárůst hodnoty kritického tlaku, tzn. větší odolnost vícevrstvého potrubí proti růstu trhliny než v případě homogenního potrubí ($E_1/E_2 = 1$). V práci [VIII] byl dále studován vliv poměru c/a charakterizující eliptický tvar části čela trhliny na

hodnotu kritického tlaku, viz obr. 9. Pro kvantifikaci vlivu tvaru eliptické části čela trhliny na hodnotu kritického tlaku byl použit poměr modulů pružnosti v tahu jednotlivých materiálů E_1/E_2 = 0,7.



Obr. 8 Závislost kritického tlaku na povrchové délce trhliny zakotvené na materiálovém rozhraní pro různé materiálové vlastnosti jednotlivých vrstev [VIII]

Z výsledků studie zabývající se vlivem tvaru trhliny zakotvené na materiálovém rozhraní na hodnotu kritického tlaku pro šíření trhliny z materiálového rozhraní vypočítaného pomocí kritéria odvozeného na základě faktoru hustoty deformační energie plyne, že rozdílnost eliptického tvaru trhliny charakterizované poměrem *c/a* je rozhodující jen pro krátké trhliny, viz obr. 9. V případě existence dlouhých trhlin je limitní hodnotou kritického tlaku hodnota získaná z řešení pomocí 2D numerického modelu třívrstvého potrubí (axiální trhlina nekonečné délky).



Obr. 9 Vliv povrchové délky trhliny 2*b* a eliptického tvaru trhliny na hodnotu kritického tlaku pro šíření trhliny přes materiálové rozhraní [VIII]

4.3 ODHAD ŽIVOTNOSTI VÍCEVRSTVÉHO POLYMERNÍHO POTRUBÍ

Dosud uvedené výsledky a závěry ze studia porušování vícevrstvých polymerních prostředí vycházely z porovnání hodnot lomových parametrů pro homogenní a vícevrstvé konstrukce. Se znalostí experimentálně naměřených parametrů popisující kinetiku růstu trhliny lze využitím výše uvedených závislostí lomových parametrů K_I a K_{eff} na hloubce trhliny a vztahů popisující růst creepové trhliny predikovat životnost polymerních trubek.

Odhad životnosti součásti je nezbytný nejen při návrhu součásti, ale také i při stanovení zbytkové životnosti součásti pro bezpečný chod v průběhu jejího provozu. Pro popis rychlosti šíření trhliny da/dt ve střední oblasti stabilního růstu creepové trhliny v polymerních matriálech lze využít následující relaci:

$$\frac{da}{dt} = A \cdot K_I^{\,m}, \tag{22}$$

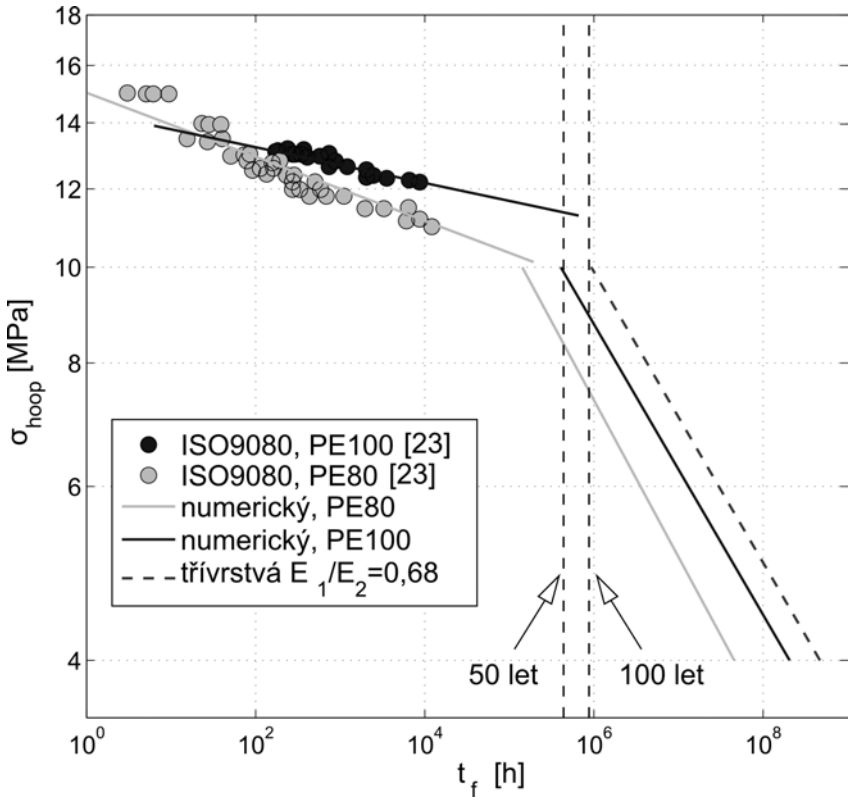
kde K_I je součinitel intenzity napětí, A a m jsou materiálové konstanty. V případě znalostí materiálových konstant, počátečního defektu a_{ini}, kritické délky trhliny a_c a K-kalibračních křivek (závislost součinitele intenzity napětí na hloubce trhliny) lze z funkce (22) za pomoci (numerické) integrace odhadnout čas do lomu součásti:

$$t_f = \frac{1}{A} \cdot \int_{a_{ini}}^{a_C} \frac{1}{K_I^{\,m}} \cdot da\,. \tag{23}$$

Odhad času do lomu tělesa s trhlinou na základě předchozího vztahu je konzervativní a nebere do úvahy pokles rychlosti šíření v blízkosti prahových hodnot. Pro odhad zbytkové životnosti polymerního potrubí se vycházelo ze zatížení vnitřním tlakem p_{appl} vyvozující ve stěně trubky obvodové napětí σ_{hoop} v rozsahu 4 – 6 MPa. Hodnota vnitřního tlaku byla stanovena ze vztahu:

$$p_{appl} = \sigma_{hoop}\left(\frac{2\,t}{D-2t}\right) \tag{24}$$

Na následujícím obrázku č. 10, je provedeno porovnání odhadu životnosti pro homogenní a třívrstvé potrubí s poddajnější ochrannou vrstvou. Hodnoty součinitele intenzity napětí odpovídají výsledkům získaným pomocí prostorového numerického modelu, viz obr. 4. Ke stanovení zbytkové životnosti byla uvažována počáteční délka trhliny a_{ini} = 0.4 mm a koncová délka trhliny a_c = 5 mm. Vzhledem k tomu, že se běžně u vícevrstvých trubek pro vnější vrstvy používá odolnější materiál proti růstu trhliny v porovnání se základním materiálem [43], budou i pro predikci životnosti v této práci použita pro ochrannou vrstvu materiálová data pro materiál odolnější proti růstu trhliny. Materiálové parametry pro jednotlivé vrstvy polymerního potrubí charakterizující stabilní růst creepové trhliny byly převzaty z práce [11]. Pro ochrannou vrstvu (materiál M1) byly použity materiálové parametry A = 8,5 x 10^{-7} $\mathrm{mm}/\left(\mathrm{s}\,\left(\mathrm{MPa\ m^{1/2}}\right)^m\right)$ a m = 6,8 a pro základní materiál (materiál M2) byly použity parametry A = 1,4 x 10^{-6} $\mathrm{mm}/\left(\mathrm{s}\,\left(\mathrm{MPa\ m^{1/2}}\right)^m\right)$ a m = 6,3 [11].



Obr. 10 Odhad životnosti pro homogenní a třívrstvé potrubí s poddajnější ochrannou vrstvou

Z odhadnuté zbytkové životnosti, viz obr. 10, pro homogenní potrubí (materiál PE80 a materiál PE100) a pro třívrstvé polymerní potrubí je patrné, že existence poddajnější ochranné vrstvy vede k nárůstu životnosti při porovnání s homogenním potrubím. Na základě provedených výpočtů životnosti, lze vyslovit závěr, že vhodnou volbou materiálových vlastností jednotlivých vrstev je možno pozitivně ovlivnit životnost vícevrstvých trubek a jejich odolnost proti růstu creepových trhlin. Pro přesnější odhad životnosti třívrstvého potrubí je nutná znalost materiálových parametrů popisující stabilní růst creepové trhliny jak základního materiálu, tak materiálu ochranné vrstvy pro danou materiálovou konfiguraci vícevrstvého potrubí.

5 ZÁVĚR

Disertační práce se zabývá popisem porušování vícevrstvých polymerních prostředí. Hlavním cílem bylo studium chování trhliny blížící se k materiálovému rozhraní a definice podmínek přechodu přes bi-materiálové rozhraní. Pro popis růstu trhliny přes materiálové rozhraní bylo nutné definovat vhodný popis pole napětí v okolí takové trhliny, vhodné kritérium stability a mechanismus porušení studovaných polymerních prostředí. Jedním z důležitých mechanismů porušení u polymerních materiálů, zejména v aplikacích tlakových rozvodů, je porušení „pomalým šíření trhliny“, proto mu byla věnována v této práci největší pozornost. Růst takovéto trhliny byl popsán pomocí součinitele intenzity napětí, popř. zobecněného součinitele intenzity napětí a byla predikována životnost na příkladech vícevrstvých polymerních potrubí.

Na základě cílů práce, které byly definovány v kapitole 3, je možno výsledky dosažené v rámci řešení disertační práce shrnout následovně:

1) S využitím metody konečných prvků navrhnout a vytvořit relevantní numerický model vícevrstvé struktury, který bude umožňovat stanovení součinitele intenzity napětí podél čela trhliny v homogenním materiálu a stanovení zobecněného součinitele intenzity napětí pro trhlinu s vrcholem na bimateriálovém rozhraní.

Při řešení disertační práce byly vytvořeny rovinné a prostorové numerické modely vícevrstvých těles s trhlinou orientovanou kolmo k materiálovému rozhraní. Pomocí těchto modelů bylo možno stanovit lomové parametry pro trhlinu jak v homogenní materiálu, tak i pro trhlinu s vrcholem na materiálovém rozhraní. Na základě porovnání výsledků z jednotlivých modelů, bylo zjištěno, že modelování šíření trhliny v oblasti kvazi-křehkého porušení, tj. v režimu tzv. „pomalého šíření trhliny“, je nutno provádět ve 3D, protože realistický odhad tvaru šířící se trhliny významně zpřesní získané výsledky.

2) Pro trhlinu šířící se z počátečního defektu na povrchu tělesa pomocí 3D numerického modelu odhadnout tvar šířící se trhliny a vliv existence materiálového rozhraní na hodnotu součinitele intenzity napětí, respektive na residuální zbytkovou životnost.

Pomocí vytvořeného 3D numerického modelu vícevrstvého tělesa byl stanoven vliv materiálového rozhraní na hodnotu součinitele intenzity napětí a také byl odhadnut tvar trhliny šířící se z povrchu součásti směrem k materiálovému rozhraní. Z výsledků získaných na numerickém modelu je patrné, že při šíření trhliny z poddajnější ochranné vrstvy směrem k tužšímu základnímu materiálu dosahuje součinitel intenzity napětí v porovnání s totožnou trhlinou v homogenním potrubí výrazně nižších hodnot. Rozdíl výsledků pro analyzované materiálové vlastnosti vícevrstvého tělesa vzhledem k tělesu z homogenního materiálu je významný a závisí na poměru modulů pružnosti jednotlivých složek. Výsledky odhadu reziduální životnosti vícevrstvého polymerního potrubí a potrubí z homogenního

materiálu vykazují taktéž pozitivní vliv existence poddajnější vrstvy u vícevrstvého potrubí na životnost.

Dále byl studován vliv materiálového rozhraní na změnu tvaru šířící se trhliny. Z výsledků vyplývá, že v případě krátké trhliny je tvar čela šířící se trhliny podobný jako v homogenním tělese. Pokud se čelo trhliny nachází již blíže k materiálovému rozhraní, je z výsledků patrný růst trhliny v podélném směru vůči materiálovému rozhraní (nárůst poměru *b/a*). V porovnání s trhlinou v homogenním materiálu je tak poměr *b/a* popisující eliptický tvar čela trhliny výrazně větší. Tvar čela trhliny je odlišný pro různé poměry materiálových vlastností jednotlivých vrstev.

3) Pro trhlinu s vrcholem, resp. čelem na rozhraní dvou polymerních materiálů definovat vhodné kriterium stability pro šíření trhliny přes rozhraní. Pro trhlinu zakotvenou na rozhraní popsat její další šíření podél rozhraní.

U vícevrstvého tělesa s trhlinou kolmou k materiálovému rozhraní a s vrcholem na tomto materiálovém rozhraní byla aplikována kritéria stability s cílem stanovit kritické zatížení způsobující růst trhliny z materiálového rozhraní. Z analyzovaných kritérií stability se na základě numerických simulací jeví jako nejvýhodnější kritérium stability založené na faktoru hustoty deformační energie. Pomocí tohoto kritéria jsou získány konzervativnější výsledky v případě poměru modulů pružnosti v tahu $E_1/E_2 < 1$, tedy v případě šíření trhliny z měkčí ochranné vrstvy do tužšího základního materiálu trubky. Jedná se o prakticky nejzajímavější materiálovou konfiguraci mající pozitivní vliv na zbytkovou životnost. Následně bylo možno na základě modifikace tohoto kritéria stability jednoduše určit efektivní hodnotu součinitele intenzity napětí. Tuto hodnotu lze již porovnat s běžně měřitelnými lomovými parametry, např. prahovou hodnotou součinitele intenzity napětí nebo lomovou houževnatostí. Byla provedena rešerše literatury se vztahy pro výpočet kritické vzdálenosti *d* (což je délkový parametr vyskytující se v kritériích stability) a bylo zjištěno, že pro aplikaci kritérií stability pro trhlinu s vrcholem na materiálovém rozhraní dvou polymerních materiálů není tento parametr klíčový a postačuje pouze jeho relativně hrubý odhad.

4) Na základě navržené metodologie kvantifikovat vliv polymerního rozhraní na šíření trhliny. Definovat případy kdy je tento vliv významný a vyslovit doporučení vedoucí ke zvýšení životnosti vrstevnatých polymerních materiálů (zejména v aplikaci na vícevrstvé polymerní trubky).

Pomocí celé řady provedených numerických simulací na vrstevnatých polymerních materiálech s trhlinou byla nalezena taková materiálová konfigurace, která má pozitivní vliv na šíření trhliny i zbytkovou životnost celé součásti. Touto materiálovou konfigurací je v případě vícevrstvých těles s trhlinou šíření trhliny z poddajnějšího materiálu do tužšího $E_1/E_2 < 1$ (poměru modulů pružnosti v tahu jednotlivých vrstev je menší než jedna). Za předpokladu ideální adheze mezi jednotlivými vrstvami, kterou lze koextruzí polymerních materiálů při výrobě docílit, je tento efekt poměrně významný i pro relativně blízké hodnoty modulů

pružnosti v tahu jednotlivých vrstev. Vhodnou materiálovou skladbou vícevrstvé trubky tak lze docílit řádově větší životnosti, než by měla trubka vyrobená pouze z jednoho materiálu.

Výsledky uvedené v této práci mají obecnou platnost pro polymerní materiály. Uvedenou metodiku hodnocení porušení vícevrstvých prostředí lze aplikovat i na jiné vícevrstvé materiály, pokud provedeme příslušné korekce, např. při volbě kritéria stability. Závěrem lze konstatovat, že všechny uvedené cíle práce byly splněny a výsledky dosažené v průběhu řešení disertační práce byly publikovány v odborných časopisech a prezentovány na mezinárodních a národních konferencích, což je doloženo mimo jiné seznamem publikovaných prací autora.

Výsledky obsažené v této práci byly dosaženy v rámci řešení projektů:

Grantové agentury České republiky:

P108/12/1560	Popis šíření creepové trhliny v polymerních materiálech při komplexním mechanickém namáhání
106/09/H035	Víceúrovňový design pokrokových materiálů
101/09/J027	Souvislost mezi strukturálními změnami, rozvojem poškození a šířením trhlin ve svařovaných polymerních součástech
106/09/0279	Mechanismy lomového porušování vrstevnatých polymerních prostředí

Specifického výzkumu na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně:

FSI-J-13-2046	Zobecnění postupů lomové mechaniky na problematiku porušování vícevrstvých inženýrských konstrukcí
FSI-J-12-21/1693	Studium lomového chování vícefázových a složených materiálů
FSI-J-11-38	Aplikace nových postupů zobecněné lomové mechaniky
FSI-J-10-41	Numerické modelování mechanických vlastností a porušení vícefázových polymerních materiálů
FSI-S-11-11/1190	Problémy pevnosti a dynamiky moderních materiálů a konstrukcí
FAST/FCH/FSI-S-11-1	Chování trhlin/mikrotrhlin v kompozitech s křehkou matricí

Grantové agentury Akademie věd České republiky:

KJB200410803	Zobecnění lineární elastické lomové mechaniky na problémy šíření trhlin v nehomogenních materiálech

6 VYBRANÉ PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA

[I] Zouhar, M., Hutař, P., Náhlík, L., Knésl, Z.; Effect of the time dependent material properties on the crack behaviour in the interface of two polymeric materials, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 47, No.2, pp. 203-210, 2011 (IF=0,421)

[II] Ševčík, M., Hutař, P., Zouhar, M., Náhlík, L.; Numerical estimation of the fatigue crack front shape for a specimen with finite thickness, *International Journal of Fatigue*, Vol. 39, pp. 75-80, 2012 (IF = 1,602)

[III] Nezbedová, E., Hutař, P., Zouhar, M., Knésl, Z., Sadílek, J., Náhlík, L.; The applicability of the Pennsylvania Notch Test for a new generation of PE pipe grades, *Polymer Testing*, Vol. 32, No. 1, pp. 106-114, 2012 (IF = 1,608)

[IV] Ševčík, M., Hutař, P., Knésl, Z., Náhlík, L., Zouhar, M.; Estimation of the critical configuration of a crack arrested at the interface between two materials, *Computational Materials Science*, Vol. 64, No. 5, pp. 225-228, 2012 (IF = 1,458)

[V] Hutař P., Zouhar M., Náhlík L., Ševčík M., Máša, B.; Multilayer polymer pipe failure assessment based on fracture mechanics approach, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 33, pp. 151-162, 2013 (IF = 0,855)

[VI] Hutař P., Ševčík M., Náhlík L., Zouhar M., Knésl Z.; Assessment of surface crack stability in laminates, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 50, No. 1, pp. 9-16, 2014, (IF = 0,421)

[VII] Zouhar, M., Vallet, L., Hutař, P., Náhlík, L.; Life time estimation of the multilayer plastic pipes, *Key Engineering Materials*, Vols. 452-543, pp. 33-36, 2011

[VIII] Zouhar, M., Hutař, P., Náhlík, L., Knésl, Z.; Basic modes of crack propagation through an interface in polymer layered structure, *Key Engineering Materials*, Vols. 488-489, pp.162-165, 2012

[IX] Zouhar, M., Hutař, P., Náhlík, L., Ševčík, M., Knésl, Z.; The effect of critical distance in stability condition for the crack at the interface between two materials, Engineering mechanics, Vol. 19, no. 2/3, pp. 155-164, 2012

[X] Ševčík, M.; Zouhar, M.; Máša, B.; Hutař, P.; Náhlík, L. On a critical geometry of a crack arrested at a bimaterail interface. In Conference Proceedings of the 14th International Conference APPLIED MECHANICS, pp. 1-4. ISBN: 978-80-261-0097- 3, 2012

7 POUŽITÁ LITERATURA

[1] Anderson T. L.; Fracture Mechanics – Fundamentals and Application, CRC Press Inc., 2005

[2] Atkinson, C.; On the stress intensity factors associated with fracka interacting with an interface between two elastic media, International Journal of engineering Science, Vol. 13, pp. 489-504, 1975

[3] Bogy, D.B.; On the plane elastic problem of a loaded crack terminating a material interface, International Journal of Fracture, Vol. 38, pp. 911–918, 1971

[4] Cook TS, Erdogan F.; Stresses in bonded materials with a crack perpendicular to the interface. International Journal of Engineering Science, Vol. 10, pp. 677–697, 1972

[5] 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, 16 s. , 2009

[6] Dundurs, J. In: Mura, T. (Ed.); Mathematics of Dislocation. ASME, New York, pp. 70–115, 1969

[7] England, A.H.; A crack between dissimilar Media, Journal of Applied Mechanics, Vol.32, pp. 400-402, 1965

[8] Erdogan, F.; Stress distribution in a nonhomogenous elastic plane with cracks, Journal of Applied Mechanics, Vol.30, Issue 2, pp. 232-236, 1963

[9] Farshad, M.; Determination of the long-term hydrostatic strength of multilayer pipes, Polymer Testing, Vol. 24, Issue 8, pp. 1041-1048, 2005

[10] Fenner, D., N.; Stress singularities in composite materials with an arbitrarily oriented crack meeting an interface. International Journal of Fracture, Vol. 12, pp. 705-721, 1976

[11] Frank, A., Hutar, P., Pinter, G.; Numerical assesment of PE 80 and PE 100 pipe lifetime based on Paris-Erdogan equation, Macromolecular Symposia, Volume 311, Issue 1, pp. 112-121, 2012

[12] Frank, A., Pinter, G.; Evaluation of the applicability of the cracked round bar test as standardized PE-pipe ranking tool, Polymer Testing, Volume 33, pp. 161-171, 2014

[13] Hutař, P., Ševčík, M., Náhlík, L., Mitev, I., Frank, A., Pinter, G.; Numerical simulation of the failure behavior of PE pressure pipes with additional loads, ANTEC 2009. United States: Society of Plastics Engineers, Inc., pp. 2163-2168, 2009

[14] Hutař, P., Náhlík, L., Šestáková, L., Ševčík, M., Knésl, Z., Nezbedová, E.; A fracture mechanics assessment of surface cracks existing in protective layers of multi-layer composite pipes, Composite Structures, Vol. 92, Issue 5, pp. 1120-1125, 2010

[15] Chan, S. K, Tuba, I. S., Wilson, W. K.; On the finite element method in linear fracture mechanics, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 2, pp. 1-17, 1970

[16] Chawla, N., Chabla K.K.; Metal Matrix Composites, Springer, ISBN 978-0-387-28567-2, 2006

[17] Chiang, C.R.; On the stress intensity factors of crack near an interface between two media. International Journal of Fracture, Vol. 47, pp. R55-R88, 1991

[18] Chudnovsky, A., Zhou, Z., Zhang, H., Sehanobish, K.; Lifetime assessment of engineering thermoplastics, International Journal of Engineering Science, Vol. 59, pp. 108-139, 2012

[19] Irwin, G.R.; Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack traversing a Plate, Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, pp. 361-364, 1957

[20] ISO 16241:2005; Notch tensile test to measure the resistence to slow crack growth of polyethylene materials for pipe and fitting products (PENT), International Organization for standardization, 13 pages, 2005

[21] ISO 16770:2004; Plastic – determination of enviromental stress cracking (ESC) of polyethylene – Full-Notch creep test (FNCT), International Organization for standardization, 13 pages, 2004

[22] Kaddouri, K., Belhouari, M., Bachir Bouiadjra, B., Serier, B.; Finite element analysis of crack perpendicular to bi-material interface: Case of couple ceramic–metal, Computational Materials Science, Vol. 35, Issue 1, pp. 53-60, 2006

[23] Knésl, Z.; A criterion of V-notch stability, International Journal of Fracture, Vol. 48, pp. 79–83, 1991

[24] Knésl, Z., Knápek, A., Bednář, K.; Evaluation of the critical stress in bonded materials with a crack perpendicular to the interface, Surface Modification Technologies XI, the Institute of Materials, London, pp. 153-159, 1998

[25] Knésl, Z., Klusák, J., Náhlík, L.; Crack initation kriteria for singular stress concentrations – part I: A universal assesment of singular stress concentrations. Engineering Mechanics, Vol. 14, Issue 6, pp. 399-408, 2007

[26] Kunz, J.; Základy lomové mechaniky. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000

[27] Lin, K.Y., Mar, J., W.; Finite element analysis of stress intensity factor for crack at a bi-material interface, International Journal of Fracture, Vol. 12, Issue 4, pp. 521-531, 1976

[28] Marsavina L., Sadowski T.; Kinked crack at a bi-material ceramic interface – Numerical determination of fracture parameters, Computational Materials Science, Vol. 44, Issue 3, Pages 941-950, 2009

[29] Meguid, S.A., Tan, M., Zhu, Z.H.; Analysis of crack perpendicular to bi-material interface using a novel finite element. International Journal of Fracture, Vol. 75, pp. 1 - 25, 1995

[30] Menčík, J.; Mechanics of Components with Treated or Coated Surfaces, Springer, 1996

[31] Murakami, Y., and Co-editors; Stress intensity factor handbook, Vol.1, Tokyo: Pergamon Press, 1987

[32] Náhlík, L.;Fatigue crack propagation near an interface of two elastic materials. Ph.D. thesis, Faculty of Mechanical Engineering BUT Brno and Institute of Physics of Materials AS CR Brno, 2002

[33] Náhlík, L., Knésl, Z., Klusák, J.; Crack initation kriteria for singular stress concentrations – part III: An aplication to a crack touching a bimaterial interface. Engineering Mechanics, Vol. 15, no.2, pp. 99-114, 2008

[34] Náhlík, L., Šestáková, L., Hutař, P.; Estimation of apparent fracture toughness of ceramic laminates. Computational materials science, Vol. 46, Issue 3, pp. 614-620, 2009

[35] Parsons, M., Stepanov, E. V., Hiltner, A., Baer, E.; Correlation of stepwise fatigue and creep slow crack growth in high density polyethylene, Journal of Materials Science, Vol. 34, pp. 3315–3326, 1999

[36] Pinter, G. Haager, M., Balika, W., Lang, R.W.; Cyclic crack growth tests with CRB specimens for the evaluation of the long-term performance of PE pipe grades, Polymer Testing, Vol 26, Issue 2, pp. 180-188, 2007

[37] Pinter, G., Lang, R. W., Haager, M.; A test concept for lifetime prediction of polyethylene pressure pipes, Chemical Monthly, Vol. 138, pp. 347–355, 2007

[38] Romeo A, Ballarini, R; A crack very close to a bi-materila interface, Trans ASME, Vol. 32, pp. 614-619, 1995

[39] Shah, A., Stepanov, E.V., Klein, M. , Hiltner, A., Baer, E.; Study of polyethylene pipe resins by a fatigue test that simulates crack propagation in a real pipe, Journal of Material Science, pp. 3313-3319, 1998

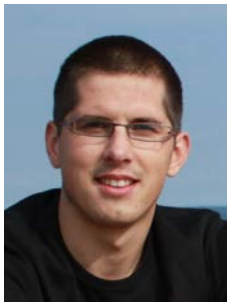
[40] Sih, G.C.; Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems, International Journal of Fracture, Vol. 10, No. 3, pp. 179-214, 1974

[41] Sih, G.C.; A special theory of crack propagation, Mechanics of Fracture, Noordhoff International Publishing, Leyden 1977
[42] Vlk, M.; Mezní stavy a spolehlivost, Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 2002
[43] Wawin, produktový katalog – Sanace potrubních systémů, http://cz.wavin.com
[44] Williams, M.L.; Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plate in extension. Journal of Applied Mechanics, Vol. 74, pp. 526-528, 1952

8 CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Michal Zouhar
Datum narození: 22. září 1985
Státní příslušnost: česká
Rodinný sav: ženatý
Adresa: Senetářov 154,
679 06 Jedovnice
Česká republika
email: zouhar@ipm.cz



Vzdělání:

2009 – dosud
Doktorské studium na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně
Obor: Inženýrská mechanika
Téma dizertační práce: Popis porušování vícevrstvých polymerních prostředí

2007 – 2009
Magisterské studium na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně
Obor: Inženýrská mechanika a biomechanika
Téma diplomové práce: Deformačně napěťová analýza a hodnocení mezních stavů částí tlustostěnného potrubí v oblasti creepu

2004 – 2007
Bakalářské studium na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně
Obor: Strojní inženýrství
Téma bakalářské práce: Konstrukční řešení těsnosti vodorovného šoupátka

2000 – 2004
Maturitní studium na Střední průmyslové škole v Jedovnicích

Pracovní zkušenosti:

09/2009 – dosud
Technický pracovník, vědecký asistent ve skupině vysokocyklové únavy materiálů, Ústav fyziky materiálů AV ČR, v.v.i., Žižkova 22, 616 62 Brno

08/2011 – dosud
Projektový manažer, pracovník projektové podpory – administrativní a finanční řízení projektu Operačního programu Vzdělávání pro Konkurenceschopnost (OP VK) a projektu Operačního programu Výzkumu a Vývoje pro Inovace (OP VaVpI), Ústav fyziky materiálů AV ČR, v.v.i., Žižkova 22, 616 62 Brno

Odborná činnost:

- Člen řešitelského týmu grantových projektů GAČR, řešených na ÚFM AV ČR, v.v.i.
- Navrhovatel, spolunavrhovatel a řešitel čtyř schválených juniorských projektů specifického výzkumu na FSI VUT v Brně
- Člen organizačního výboru konferencí *Applied mechanics 2011* - Velké Bílovice a *Víceúrovňový design pokrokových materiálů 2011* – Brno
- Absolvent specializovaných kurzů, seminářů a školení:
  1) *Kurz projektového řízení*, Brno (1 týden)
  2) *Letní škola mechaniky kompozitních materiálů*, Orlík (1 týden)
  3) *Kurz základů vědecké práce*, Brno (1 týden)
  4) *Composite materials technology*, Aarhus, Dánsko (2 týdny)
  5) *Doplňující pedagogické studium*, Brno (8 týdnů)

Aktivní účast na mezinárodních vědeckých konferencích, např.:

1) Fracture and Damage Mechanics 2013, Itálie
2) Mechanics of Composite Materials 2012, Lotyšsko
3) Fracture and Damage Mechanics 2011, Chorvatsko
4) International Conference on Materials Structure and Micromemechanics of Fracture 2010, Česká republika

Vědecká ocenění:

2013 Cena časopisu Engineering Mechanics 1. stupně

9 ABSTRACT

The aim of this thesis is to describe behavior of cracks in layered polymer materials. Quasi-brittle fracture (through the initiation and subsequent crack propagation mechanism) under low stresses is the most common mode of failure of polymer materials. In this case plastic deformations are localized in the vinicity of the crack tip and linear elastic fracture mechanics description of the crack behavior can be used. The knowledge of fracture parameters change during the crack propagation in multilayer body is a key point for establishing of the maximum load and consequently for the assessment of the residua lifetime. In contrast to homogeneous bodies the estimation of stress intensity factors for multilayer (composite) structure is numerically more elaborated and the fracture mechanics approach is complicated by the existence of interfaces between single layers, where material parameters are changed by a step. Special attention is paid to the configuration of a crack growing close to the material interface and along the interface. For the crack with tip on the material interface the effective values of stress intensity factor based on the crack stability criteria are estimated. It is shown that under special conditions (depending mainly on the elastic mismatch of materials) the existence of material interface has positive influence on the lifetime of the multilayered structure.