

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 554

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Lucie Šestáková

**Hodnocení stability
obecných koncentrátorů napětí
ve vrstevnatých materiálech**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Lucie Šestáková

**HODNOCENÍ STABILITY OBECNÝCH KONCENTRÁTORŮ
NAPĚTÍ VE VRSTEVNATÝCH MATERIÁLECH**

STABILITY ASSESSMENT OF GENERAL STRESS
CONCENTRATORS IN LAYERED MATERIALS

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: prof. RNDr. Zdeněk Knésl, Csc.
Školitel specialista: doc. Ing. Luboš Náhlík, Ph.D.
Oponenti: prof. RNDr. Michal Kotoul, DrSc.
Ing. Eva Nezbedová, CSc.
Ing. Svatopluk Pták, CSc.
Datum obhajoby: 20.10.2009

KLÍČOVÁ SLOVA

Šíření trhlin, bi-materiálové rozhraní, kritéria stability, vrstevnaté polymerní trubky, keramické lamináty.

KEY WORDS

Crack propagation, bi-material interface, stability criteria, multilayer polymer pipes, ceramic laminates.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Disertační práce je uložena na oddělení vědy a výzkumu
Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno.

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	5
3	CÍLE PRÁCE.....	6
4	NAPJATOST V OKOLÍ VRCHOLU TRHLINY	7
4.1	EXPONENTY SINGULARITY NAPĚTÍ.....	8
4.2	VLASTNÍ VEKTORY	8
4.3	ZOBECNĚNÉ SOUČINITELE INTENZITY NAPĚTÍ	8
5	KRITÉRIA STABILITY	8
5.1	KRITÉRIUM STŘEDNÍHO NAPĚTÍ	9
5.2	KRITÉRIUM ZALOŽENÉ NA VELIKOSTI PLASTICKÉ ZÓNY	10
5.3	KRITÉRIUM ZALOŽENÉ NA FAKTORU HUSTOTY DEFORMAČNÍ ENERGIE ...	10
5.4	KRITÉRIUM OTEVŘENÍ TRHLINY	10
6	VYBRANÉ VÝSLEDKY	10
6.1	VÍCEVRSTVÉ POLYMERNÍ TRUBKY	10
6.2	KERAMICKÉ LAMINÁTY	15
6.2.1	Směr šíření trhliny v keramickém laminátu typu Al_2O_3/ZrO_2	15
6.2.2	Keramický laminát typu ATZ/AMZ	17
7	ZÁVĚR	24
7.1	TEORETICKÉ STUDIE	24
7.2	PRAKTICKÉ APLIKACE.....	25
7.2.1	Vícevrstvé polymerní trubky.....	25
7.2.2	Keramické lamináty.....	25
8	LITERATURA	26
9	SEZNAM AUTORČINÝCH PUBLIKACÍ	28
10	CURRICULUM VITAE	31
11	ABSTRACT	32

1 ÚVOD

Současným trendem při návrhu nových konstrukčních materiálů se stává koncepce jejich vzájemného vrstvení. Ukazuje se, že vrstevnaté materiály (např. keramické případně polymerní kompozity nebo v praxi velice často využívaná kombinace podklad – ochranná vrstva) vykazují lepší lomově mechanické vlastnosti, než mají původní materiály jednotlivých složek. Vlivem přítomnosti rozhraní v součásti a s tím související skokové změny materiálových vlastností konstrukce dochází k přerozdělení napětí v tělese a tím k ovlivnění chování případné trhliny. Lze konstatovat, že právě existence rozhraní v kompozitu může v některých případech působit jako bariéra proti šíření trhliny, jindy může působit jako místo iniciace trhliny.

Tato práce se zabývá problematikou trhlín s vrcholem v blízkosti bi-materiálového rozhraní, včetně konfigurace trhliny s vrcholem přímo na rozhraní. Trhlina s vrcholem na bi-materiálovém rozhraní reprezentuje (stejně jako např. V-vrub) tzv. obecný singulární koncentrátor napětí a pro popis jejího chování je nutné zobecnění klasických postupů lomové mechaniky. S návazností na požadavky technické praxe je cílem práce popsat chování takovýchto trhlín, ať už co se týče rychlosti jejich šíření, směru dalšího šíření nebo stabilitních kritérií umožňujících rozhodnout o samotném šíření či nešíření trhliny.

Práce obsahuje kritický teoretický rozbor problematiky a je zaměřena převážně prakticky. Jejím cílem je, mimo jiné, navrhnout a aplikovat vhodné postupy a kritéria popisující chování trhlín v kompozitních materiálech. Praktická část práce je zaměřena na keramické a polymerní kompozity - určování jejich lomových parametrů numericky, návrh zkušebních těles pro určení jejich lomových parametrů experimentálně, odhad směru dalšího šíření trhliny při průchodu přes rozhraní pomocí metody konečných prvků, případně srovnání se směry šíření pozorovanými při experimentech.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Práce se zabývá hodnocením chování těles s trhlinou a je založena na předpokladu platnosti koncepcí lomové mechaniky. Postupy klasické lineární elastické lomové mechaniky (LELM) byly původně odvozeny pro trhlinu v homogenním materiálu s exponentem singularity $\frac{1}{2}$. Základní myšlenkou lomové mechaniky a jejích tzv. lomových kritérií (kritérií stability) je rozhodnout, zda se trhlina v materiálu bude či nebude šířit, případně v jakém směru.

Zatímco šíření trhlín v homogenním tělese je již relativně podrobně prostudováno, je v současné době snahou rozšířit teorii lomové mechaniky na materiály s rozhraním, gradientní materiály ([9], [35]) atp., které nahrazují čím dál častěji materiály klasické, neboť vykazují lepší vlastnosti. Klasickým příkladem jsou vrstevnaté keramické lamináty se zvýšenou lomovou houževnatostí ve srovnání s křehkými materiály jednotlivých vrstev, viz např. [2] až [6].

Pro hodnocení lomového chování trhlin s vrcholem na bi-materiálovém rozhraní je nutné znát analytický popis napětí před vrcholem trhliny, jehož obecné formulace lze nalézt v literatuře, viz např. [8], [19], [20] pro trhlínu kolmou k bi-materiálovému rozhraní a [7], [10], [15] pro trhlínu obecně orientovanou k rozhraní.

Největším problémem v oblasti zobecněné lomové mechaniky jsou kritéria stability. Dosud jich existuje jen velmi málo, přičemž většina z nich se omezuje na konkrétní konfigurace, není ještě dostatečně otestována nebo se teprve vyvíjí.

3 CÍLE PRÁCE

Ukazuje se (viz např. keramické lamináty, polymerní kompozity nebo kombinace ochranná vrstva - podklad), že existence rozhraní mezi jednotlivými materiálovými složkami v kompozitu může pozitivně ovlivnit jeho lomově mechanické vlastnosti. V případě porušení vyvolaných přítomností trhliny je klíčovou otázkou interakce trhliny s rozhraním. Obecným cílem výzkumu realizovaného v rámci disertace v této oblasti je popsat chování trhliny šířící se v okolí, respektive přes rozhraní dvou různých materiálů a na základě získaných výsledků navrhnout postupy hodnocení vlivu materiálového složení a geometrického uspořádání vrstevnatého kompozitu na jeho odolnost proti lomově-mechanickému porušování. Předpokládaným a žádoucím výsledkem je pak mimo jiné i zvýšení spolehlivosti a provozní životnosti konstrukcí využívajících vrstevnaté kompozity.

Zadané cíle disertace vycházející z těchto formulací řeší problematiku v rámci předpokladů lineární elastické lomové mechaniky a lze je uvést následovně:

S využitím metody konečných prvků navrhnout spolehlivý numerický model umožňující výpočet napětí a deformací v okolí vrcholu trhliny, která se šíří v blízkosti rozhraní dvou elastických materiálů, případně která má vrchol na tomto rozhraní.

Navrhnout postup, který umožňuje v obou případech stanovit hodnoty lomově-mechanických parametrů lineární a zobecněné lineární elastické mechaniky, zejména pak hodnoty součinitele a zobecněného součinitele intenzity napětí.

Pomocí metody konečných prvků stanovit zejména hodnoty součinitele a zobecněného součinitele intenzity napětí v závislosti na materiálovém složení obou materiálů a geometrické konfiguraci trhlina-rozhraní a diskutovat přesnost a spolehlivost získaných veličin.

Diskutovat a analyzovat možnosti aplikací kritérií stability pro trhlínu šířící se přes rozhraní dvou materiálů (včetně stability trhliny s vrcholem na rozhraní) pro různé případy materiálového složení a možné geometrické konfigurace.

Získané postupy a výsledky použít pro řešení praktických příkladů (ochranné vrstvy, vícevrstvé trubky, keramické lamináty, ...) a to jak v laboratorní praxi (kalibrace nehomogenních zkušebních vzorků), tak i v případech konstrukcí porušovaných šířením trhlin (stanovení kritického lomového napětí).

4 NAPJATOST V OKOLÍ VRCHOLU TRHLINY

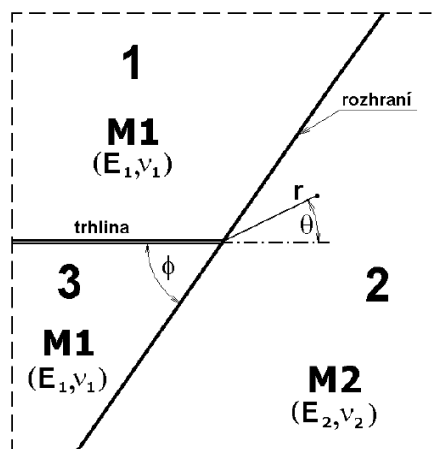
Obecný popis napjatosti v okolí vrcholu obecně orientované trhliny končící na materiálovém rozhraní byl v minulosti často studován a lze ho nalézt v literatuře, viz např. [10], [21]:

$$\sigma_{rr}^{(j)} = -\sum_{i=1}^n \lambda_i r^{\lambda_i-1} \frac{H_i}{\sqrt{2\pi}} \left[a_i^{(j)} (\lambda_i + 1) \sin(\lambda_i + 1)\theta + b_i^{(j)} (\lambda_i + 1) \cos(\lambda_i + 1)\theta + \right. \\ \left. + c_i^{(j)} (\lambda_i - 3) \sin(\lambda_i - 1)\theta + d_i^{(j)} (\lambda_i - 3) \cos(\lambda_i - 1)\theta \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(j)} = \sum_{i=1}^n \lambda_i (\lambda_i + 1) r^{\lambda_i-1} \frac{H_i}{\sqrt{2\pi}} \left[a_i^{(j)} \sin(\lambda_i + 1)\theta + b_i^{(j)} \cos(\lambda_i + 1)\theta + \right. \\ \left. + c_i^{(j)} \sin(\lambda_i - 1)\theta + d_i^{(j)} \cos(\lambda_i - 1)\theta \right] \quad (2)$$

$$\sigma_{r\theta}^{(j)} = -\sum_{i=1}^n \lambda_i r^{\lambda_i-1} \frac{H_i}{\sqrt{2\pi}} \left[a_i^{(j)} (\lambda_i + 1) \cos(\lambda_i + 1)\theta - b_i^{(j)} (\lambda_i + 1) \sin(\lambda_i + 1)\theta + \right. \\ \left. + c_i^{(j)} (\lambda_i - 1) \cos(\lambda_i - 1)\theta - d_i^{(j)} (\lambda_i - 1) \sin(\lambda_i - 1)\theta \right] \quad (3)$$

V rovnicích (1) až (3) index i představuje příslušnost označených veličin k danému exponentu singularity napětí p_i (počet exponentů singularity n je buď $n = 2$ pro převážnou část konfigurací obecně orientované trhliny a nebo $n = 1$ pro trhlinu kolmou k rozhraní, jakožto speciální případ obecně orientované trhliny, a minoritní část konfigurací obecně orientované trhliny, které v této práci nebudou řešeny). Horní index (j) poukazuje na spojitost dané veličiny s příslušnou oblastí 1, 2, 3 bi-materiálu (viz obr. 1). Veličina A_i odpovídá zobecněnému součiniteli intenzity napětí příslušející exponentu singularity p_i , resp. vlastnímu číslu λ_i , přičemž $\lambda_i = 1 - p_i$, a (r, θ) jsou polární souřadnice s počátkem ve vrcholu trhliny, pro podrobnosti viz např. [22].



Obr. 1 Trhlina obecně orientovaná k rozhraní materiálů M1 a M2

Pro stanovení složek tenzoru napětí u konkrétní geometrické a materiálové konfigurace je nutné provést následující tři kroky:

- (a) určit odpovídající exponenty singularity napětí;
- (b) nalézt vlastní vektory $a_i^{(1)}$ až $d_i^{(3)}$ odpovídající příslušnému vlastnímu číslu λ_i ;
- (c) určit tzv. zobecněné součinitele intenzity napětí H_i .

4.1 EXPONENTY SINGULARITY NAPĚTÍ

Obecně se u trhliny s vrcholem na bi-materiálovém rozhraní určuje vlastní číslo λ , resp. λ_1 a λ_2 (dle konkrétní konfigurace), z podmínky netriviálního řešení homogenní soustavy 12ti rovnic (podmínka nulového determinantu soustavy rovnic) sestavené z okrajových podmínek problému, viz např. [10], [21] pro podrobnosti.

4.2 VLASTNÍ VEKTORY

Protože je soustava rovnic sestavených z okrajových podmínek homogenní, lze získat pouze proporcionální řešení, tj. poměry mezi jednotlivými konstantami, přičemž jako vhodná se ukázala volba $d_i^{(2)} = 1$, neboť pro tuto hodnotu p v homogenním případě (tj. pro $E_1 = E_2$ a $\nu_1 = \nu_2$) platí $H \rightarrow K$.

4.3 ZOBECNĚNÉ SOUČINITELE INTENZITY NAPĚTÍ

K určení hodnot zobecněného součinitele intenzity napětí lze využít tzv. přímou metodu, viz např. [36], pro jejíž aplikaci postačuje libovolný software založený na numerickém řešení (např. metodě konečných prvků apod.) bez dalších úprav. Metoda je založena na porovnání numericky určených hodnot napětí před vrcholem trhliny s analytickým řešením, přičemž je provedena extrapolace lineární části závislosti $H^* = H^*(r)$ do bodu $r = 0$ (tj. do vrcholu trhliny). Jestliže je $n = 2$, vzniká však pro každou hodnotu vzdálenosti r soustava dvou rovnic pro neznámé H_1 a H_2 . Je tedy nezbytné sestavit počítačový program řešící zmiňovanou soustavu pro každou vzdálenost r .

Alternativou k přímé metodě určení zobecněného součinitele intenzity napětí, která eliminuje náročnost na kvalitu sítě v okolí vrcholu trhliny, je využití tzv. ψ -integrálu či M-integrálu. Tyto integrální postupy jsou založeny na předpokladu platnosti Bettiho recipročního teorému [30], [31] a zobecněný součinitel intenzity napětí je pomocí něj možné určit z křivkového integrálu, který je nezávislý na integrační cestě kolem vrcholu trhliny, detaily viz např. [11], [12], [23], [24], [25].

5 KRITÉRIA STABILITY

Při návrhu kritéria stability se často vychází z předpokladu, že mechanismus šíření trhliny s vrcholem na bi-materiálovém rozhraní (obr. 1) je stejný jako mechanismus šíření trhliny v homogenním tělese, viz např. [16]. Lze tedy říci, že stabilita trhliny je kontrolována v obou případech stejnou veličinou L , která má jasný fyzikální význam a je definovatelná v obou případech (např. hustota

deformační energie, otevření trhliny, střední hodnota napětí, apod.). Při použití tohoto přístupu pro šíření trhliny v homogenním materiálu M (u kterého se předpokládá, že má stejné vlastnosti jako materiál M2 za rozhraním bi-materiálového tělesa) platí: $L = L (...K(M)...)$ a v případě trhliny s vrcholem na bi-materiálovém rozhraní šířící se do materiálu M2 platí: $L = L (...H(M1/M2)...)$. Na základě předpokladu, že k nestabilnímu šíření trhliny dojde za podmínek: $K = K_C(M)$ a $H = H_C(M1/M2)$, tj. veličina L dosáhne své kritické hodnoty $L = L_C$, která je v obou případech identická [16]:

$$L_C(...K_C(M)...) = L_C(...H_C(M1/M2)...) . \quad (4)$$

Na základě rovnice (4) lze určit vztah mezi $K_C(M)$ a $H_C(M1/M2)$ a dále vypočítat kritické aplikované napětí σ_C , při jehož dosažení dojde k nestabilnímu šíření trhliny, a to z podmínky:

$$H(\sigma_{appl}) < H_C(M1/M2) . \quad (5)$$

Stanovení kritického napětí je výhodné s ohledem na fyzikální rozměr zobecněného součinitele intenzity napětí, který je závislý na velikosti exponentu singularity napětí, aby bylo možné porovnávat výsledné veličiny pro různé geometrické i materiálové konfigurace a kombinace.

Pro hodnocení stability trhlín s vrcholem na bi-materiálovém rozhraní v konkrétních aplikacích – polymerních trubkách a keramických kompozitech – je možné využít některé z kritérií, která byla odvozena pro kolmou trhlínu s vrcholem na bi-materiálovém rozhraní:

- kritérium středního napětí [22];
- kritérium založené na velikosti plastické zóny [18];
- kritérium založené na faktoru hustoty deformační energie [21], [22];
- kritérium otevření trhliny [1], [17].

Je důležité na tomto místě poznamenat, že v případě trhliny s vrcholem na bi-materiálovém rozhraní je většinou nutné (na rozdíl od kritérií stability pro trhlínu v homogenním materiálu) v závislosti na mechanismu porušení materiálu zavést nový, obvykle délkový parametr r , resp. d před vrcholem trhliny, kde se kritéria aplikují (např. [28], [29]). Význam tohoto parametru, resp. metodika pro jeho určení zatím nejsou v literatuře uspokojivě vysvětleny. V souvislosti s touto problematikou je vhodné alespoň zmínit tzv. teorii kritických vzdáleností (theory of critical distances, TCD), viz např. [32] až [34].

5.1 KRITÉRIUM STŘEDNÍHO NAPĚTÍ

Kritérium stability založené na hodnotě středního napětí před vrcholem trhliny předpokládá, že veličinou L řídící šíření trhliny je rozevírací napětí před vrcholem trhliny, resp. jeho střední hodnota získaná integrací přes jistou vzdálenost d .

5.2 KRITÉRIUM ZALOŽENÉ NA VELIKOSTI PLASTICKÉ ZÓNY

Zatímco kritérium středního napětí je vhodné především pro případy křehkého lomu, kritérium založené na velikosti plastické zóny bylo primárně odvozeno pro únavové trhliny. Pomocí něj je možné odhadnout tzv. prahovou hodnotu zatížení pro cyklicky namáhaná tělesa s trhlinou s vrcholem na rozhraní. Základním předpokladem tohoto kritéria je, že šíření trhliny je kontrolováno velikostí plastické zóny, tedy že $L = R_p$.

5.3 KRITÉRIUM ZALOŽENÉ NA FAKTORU HUSTOTY DEFORMAČNÍ ENERGIE

V sedmdesátých letech minulého století odvodil Sih kritérium stability pro trhlinu v homogenním materiálu [26], [27], které je založeno na tzv. faktoru hustoty deformační energie. Toto kritérium se považuje za jedno ze základních a na rozdíl od většiny ostatních kritérií stability umožňuje kromě podmínek pro nestabilní šíření odhadnout i směr dalšího šíření trhliny. Pro trhlinu s vrcholem na rozhraní lze analogicky odvodit tzv. zobecněný faktor hustoty deformační energie Σ a za předpokladu, že $L = \Sigma$ je možné odvodit příslušné kritérium stability.

5.4 KRITÉRIUM OTEVŘENÍ TRHLINY

Kritérium stability založené na otevření ve vrcholu trhliny *CTOD* může být aplikováno ve dvou různých formách, pro podrobnosti viz [1]. Jednak byl odvozen ryze numerický přístup založený na výpočtech pomocí MKP, který je univerzální a lze ho použít pro jakékoli kombinace materiálů (lineárně elastické, pružně plastické), a jednak bylo odvozeno kritérium na základě kombinace numerických simulací (MKP) a analytického řešení rozložení napětí a deformací v okolí vrcholu trhliny, jehož použití je omezeno na oblast LELM, tedy oblast malých plastických deformací (SSY).

6 VYBRANÉ VÝSLEDKY

V počátcích studia dané problematiky byl důraz kladen především na obecné studie (např. směru šíření trhliny, existence tzv. rohové singularity apod.) a spíše teoretické problémy. Stěžejní část práce byla následně věnována aplikaci navržených postupů na konkrétní praktické oblasti – šíření trhlín ve vícevrstvých polymerních trubkách a keramických laminátech. V této kapitole jsou uvedeny vybrané výsledky z těchto dvou analýz.

6.1 VÍCEVRSTVÉ POLYMERNÍ TRUBKY

Problematika vícevrstvých polymerních trubek byla a je zpracovávána ve spolupráci s Ústavem materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně a Polymer Institute Brno. Základním modelem je trubka sestávající se z hlavní části a jedné nebo dvou ochranných vrstev (vnitřní nebo/a vnější), jejichž materiál by měl být

vhodně zvolen, a to s ohledem především na jeho odolnost proti poškození, viz obr. 2 znázorňující geometrii studovaných trubek.



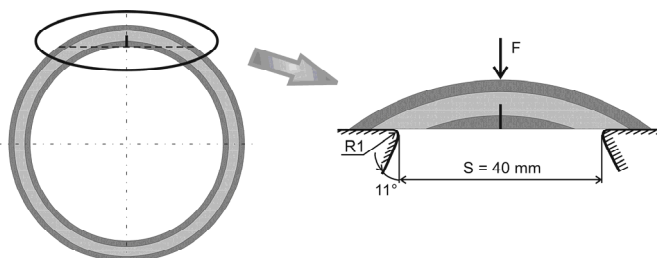
Obr. 2 Geometrie a) dvouvrstvé trubky, b) třívrstvé trubky

V této práci budou uvedeny vybrané výsledky týkající se šíření trhlin v **třívrstvých trubkách**, viz obr. 2b), u kterých je střední základní trubka obklopená z obou stran poddajnějšími vrstvami ochrannými, viz tab. I. Poissonova čísla obou materiálů byla uvažována konstantní pro všechny teploty, $\nu = 0,35$.

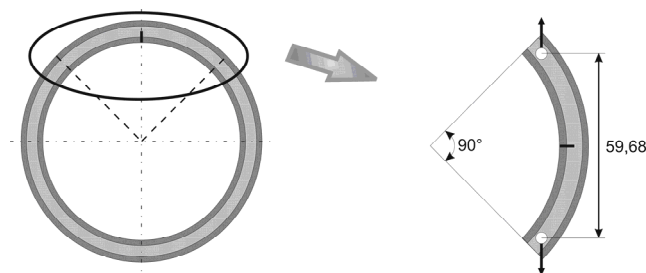
Tab. I Materiálové vlastnosti (modul pružnosti v tahu a mez kluzu) jednotlivých komponent třívrstvé trubky (PE100 – základní materiál, XSC50 – vnější ochranná vrstva)

Materiál	$T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$		$T = -20 \text{ }^\circ\text{C}$		$T = -60 \text{ }^\circ\text{C}$	
	E [MPa]	σ_0 [MPa]	E [MPa]	σ_0 [MPa]	E [MPa]	σ_0 [MPa]
PE100	1213	20	2347	33	3391	48
XSC50	828	16	1774	31	2740	45

Pro určování lomově-mechanických parametrů vícevrstevných trubek byly navrženy dva typy laboratorních vzorků, které byly zhotoveny přímo z třívrstvé trubky a které byly následně testovány a především modelovány za účelem hodnocení chování trhlin v těchto systémech. Konkrétně byl navržen vzorek pro zkoušku tříbodovým ohybem získaný z původní mezikruhové trubky tečným řezem (obr. 3) a vzorek pro tahovou zkoušku připravený z mezikruhové trubky čtvrtkruhovým výřezem (obr. 4).



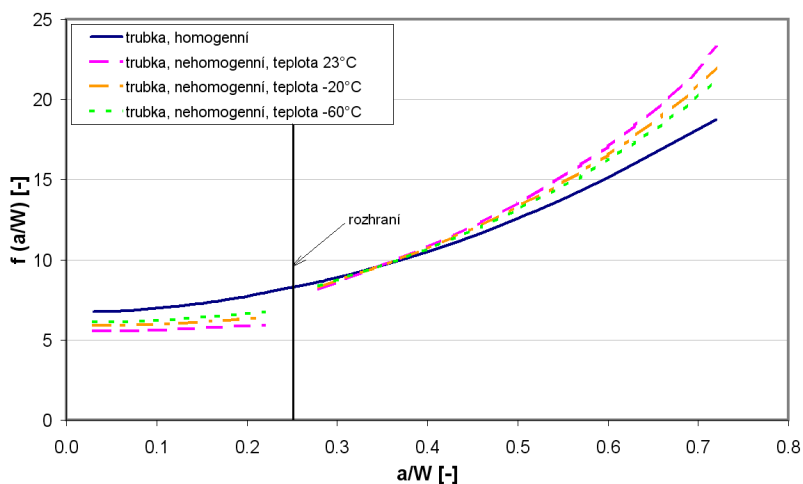
Obr. 3 Ohybový vzorek navržený pro třívrstvou trubku



Obr. 4 Tahový vzorek navržený pro třívrstvou trubku

Pro hodnocení chování trhlin ve vícevrstvých trubkách byly vytvořeny numerické modely odpovídající jak reálným trubkám, tak oběma navrženým zkušebními vzorkům. Při modelování byly taktéž dodrženy podmínky experimentálního uspořádání podle obr. 3 a 4. Během veškerých simulací lomové mechanických problémů na vícevrstvých trubkách byla uvažována platnost předpokladů LELM a dokonalé adheze mezi jednotlivými vrstvami. Materiály všech vrstev byly modelovány jako homogenní, izotropní a lineárně elastické a trhlina jako ideálně ostrá. Numerické analýzy byly prováděny v komerčním konečno-prvkovém systému ANSYS.

Jako první byly na polymerních trubkách vyhodnocovány K -kalibrační křivky neboli závislosti součinitele intenzity napětí K , resp. korekční funkce $f(a/W)$ na délce **vnitřní** trhliny a . Grafy K -kalibračních křivek byly vypracovány pro tři úlohy (trubku zatíženou vnitřním přetlakem, C-vzorek namáhaný třibodovým ohybem a C-vzorek namáhaný tahem) a taktéž pro všechny tři v tab. I zmiňované teploty (uvažované s ohledem na teplotní závislost materiálových vlastností polymerů). Pro srovnání byla tatáž analýza provedena taktéž pro homogenní případ, u kterého se předpokládá, že celá trubka je vyrobena ze základního materiálu (PE100), viz K -kalibrační křivky na obr. 5 pro ilustraci.



Obr. 5 Průběhy korekční funkce u třívrstvé trubky zatížené vnitřním přetlakem pro vnitřní trhlinu v základním materiálu pro různé teploty a pro homogenní případ

Po vytvoření K -kalibračních křivek na základě numerických simulací pomocí MKP byly tyto aproximovány polynomičnými funkcemi, které lze s výhodou využít při laboratorním určování lomové houževnatosti na vícevrstvě vzorku.

Přenositelnost lomových parametrů určených na laboratorních vzorcích na reálnou vícevrstvou trubku byla ověřena pomocí teorie dvouparametrové lomové mechaniky, která využívá veličiny zvané T-napětí, resp. parametru biaxiality B . Byly sestrojeny křivky závislosti B na délce trhliny a pro všechny uvažované geometrické a materiálové konfigurace. Neboť míra stísnění deformace před vrcholem trhliny pro laboratorní vzorky (charakterizovaná veličinou T , resp. B) je větší než pro reálnou konstrukci, jsou hodnoty lomové houževnatosti určené na zkušebních tělesech konzervativními hodnotami.

Z grafu na obr. 5 lze vidět, že K -kalibrační křivky pro homogenní případ a nehomogenní případy pro všechny tři teploty se neliší nijak výrazně. Toto je důsledek ne příliš velkého rozdílu materiálových vlastností jednotlivých vrstev. Na základě tohoto poznatku lze konstatovat, že v těchto případech lze pro odhad lomové houževnatosti vícevrstvého systému použít i korekční funkci odvozenou pro homogenní materiál bez dopuštění se příliš velké chyby. Tento závěr je možné zobecnit na vícevrstvé materiály, u nichž se materiálové vlastnosti jednotlivých složek výrazně neliší.

Obecně nežádoucím jevem u konstrukcí s materiálovým rozhraním je nespojitost K -kalibračních křivek v místě rozhraní, jak dokumentuje graf na obr. 5. Navíc, pokud by se určily hodnoty K a doplnila závislost blíže k rozhraní, byl by zřejmý prudký pokles hodnoty součinitele intenzity napětí těsně před rozhraním, šířila se trhlina z poddajnějšího do tužšího materiálu. Další analýzy proto byly věnovány problému trhliny s vrcholem na materiálovém rozhraní a odhadům tzv. efektivní hodnoty součinitele intenzity napětí K_{eff} a efektivní hodnoty lomové houževnatosti, resp. kritického napětí pro průchod trhliny přes rozhraní.

Jedna z analýz byla provedena pro třívrstvou trubku s vnitřní trhlinou zatíženou vnitřním přetlakem, kde hodnota K_{eff} byla odhadnuta ze vztahu:

$$K_{eff} = \sigma_C \sqrt{\pi a} \cdot f_{hom}(a/W), \quad (6)$$

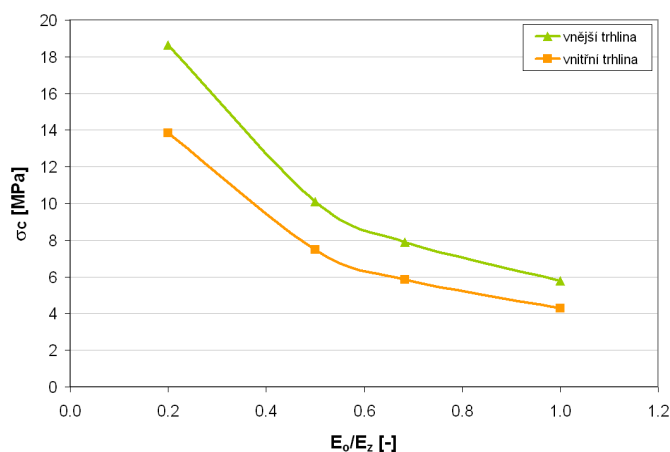
kde σ_C je hodnota kritického vnitřního přetlaku určená pomocí některého z kritérií stability, při kterém dojde k průchodu trhliny přes rozhraní do dalšího materiálu. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny pro třívrstvou trubku s vnitřní trhlinou na rozhraní mezi vnitřní ochrannou vrstvou a základním materiálem v tab. II. Horní indexy 1 a 2 odpovídají použitému kritériu: 1 – kritérium středního napětí, 2 – kritérium zobecněného faktoru hustoty deformační energie. Dolní indexy o a z značí příslušnost k materiálu: o – ochranná vrstva (vnější/vnitřní), z – základní materiál.

Tab. II Vybrané veličiny stanovené pro plný model třívrstvé trubky s vnitřní trhlinou na vnitřním rozhraní pro teploty 23 °C, -20 °C a -60 °C; index 1 – kritérium středního napětí, index 2 – kritérium zobecněného faktoru hustoty deformační energie

teplota [°C]	$E_o - E_z - E_o$ [MPa]	$K_{IC,z}$ [MPa.m ^{1/2}]	H_I [MPa.m ^p]	K_{eff}^1 [MPa.m ^{1/2}]	K_{eff}^2 [MPa.m ^{1/2}]
23	828 - 1213 - 828	3,00	61,60	6,72	6,30
-20	1774 - 2347 - 1774	2,70	58,46	5,42	5,16
-60	2740 - 3391 - 2740	2,40	56,40	4,48	4,31

Z tab. II je patrné, že ačkoli jsou použita kritéria založena každé na jiném fyzikálním principu, poskytují ve všech studovaných případech podobné výsledky. Důležitým závěrem je také poznatek, že vhodnou volbou materiálů jednotlivých vrstev lze vylepšit lomové vlastnosti celého systému – viz srovnání sloupců K_{eff}^1 a K_{eff}^2 s hodnotou lomové houževnatosti vlastní základnímu materiálu $K_{IC,z}$ v tab. II.

Zmíněné studie byly provedeny za předpokladu existence vnitřní trhliny. Část disertační práce je však věnována také případu, kdy se trhlina šíří z vnějšího povrchu. Konkrétně je popisován vliv materiálových vlastností jednotlivých vrstev na hodnotu kritického napětí (kritického vnitřního přetlaku), při které dojde k nestabilnímu šíření trhliny z rozhraní do základního materiálu. Pro výpočty kritických hodnot je použito kritérium založené na zobecněném faktoru hustoty deformační energie. Získané výsledky lze vidět v grafu na obr. 6.



Obr. 6 Závislost kritického napětí (vnitřního přetlaku) pro vnitřní a vnější trhlínu s vrcholem na rozhraní mezi ochrannou vrstvou (vnitřní/vnější) a základním materiálem v třívrstvé trubce

Na základě výsledků zobrazených v grafu na obr. 6 lze konstatovat, že šíří-li se trhlína z vnějšího povrchu, jedná se v případě studovaných trubek vždy o méně nebezpečný případ, než šíří-li se trhlína z povrchu vnitřního. Druhým významným závěrem vyplývajícím ze závislostí na obr. 6 je, že ať se jedná o vnitřní či vnější trhlínu, šíří-li se tato z poddajnějšího do tužšího materiálu, vytváří rozhraní tzv. stínící efekt a trhlína má tendenci se na rozhraní zastavit – na rozdíl od případu, šíří-li se v homogenním materiálu. Čím poddajnější jsou vrstvy, ze kterých se trhlína šíří, tím vyšší je odolnost trubky proti nestabilnímu šíření trhliny přes rozhraní do základního materiálu.

Poslední srovnání, které bylo v rámci problematiky třívrstevných trubek s trhlínou na rozhraní provedeno, je porovnání 2D a 3D řešení. Na základě výsledků v tab. III lze konstatovat, že simulace provedené na 2D modelech poskytují konzervativní výsledky. Je tedy možné je bez obav použít pro odhady lomových parametrů vrstevnatých trubek a ušetřit tím obrovské množství výpočtového času, který by byl potřebný pro simulace na komplikovaných 3D modelech.

Tab. III Hodnoty kritických napětí (kritických vnitřních přetlaků) pro třívrstvou trubku s vnitřní trhlinou na rozhraní mezi vnitřní ochrannou vrstvou a základním materiálem určené numerickými simulacemi na 2D a 3D modelu

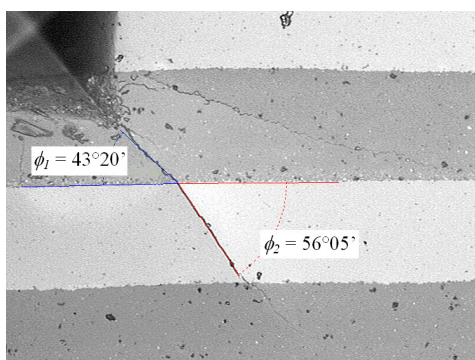
$E_o - E_z - E_o$ [MPa]	E_o/E_z [-]	σ_c (2D) [MPa]	σ_c (3D) [MPa]
828 – 1213 - 828	0,68	5,85	9,87
homogenní trubka	1,00	4,27	7,43

6.2 KERAMICKÉ LAMINÁTY

Dalším z materiálů, který (vedle plastů s nízkou hmotností, výbornou zpracovatelností a nízkou cenou, kterým byla věnována předchozí kapitola) nahrazuje dosud materiály nejrozšířenější a tradiční (zejména oceli), je keramika. Ta vyniká zejména svou odolností proti opotřebení, odolností vůči vysokým teplotám a dalšími specifickými vlastnostmi. Dalo by se říct, že jejím jediným ale o to závažnějším nedostatkem je její křehkost. Proto se hledají nové možnosti, jak lomové chování keramiky vylepšit a rozšířit tak její praktickou aplikovatelnost. Jedním ze způsobů, jak toho dosáhnout, je vzájemné vrstvení různých druhů keramiky, přičemž velmi často se lze v literatuře i praxi setkat s kombinací keramických materiálů $Al_2O_3 - ZrO_2$.

6.2.1 Směr šíření trhliny v keramickém laminátu typu Al_2O_3/ZrO_2

První typ laminátu, na kterém byly prováděny experimenty, jež byly publikovány např. v pracích [13] a [14], byl vyroben elektroforetickou metodou a skládá se z 59 pravidelně se střídajících vrstev keramiky Al_2O_3 a ZrO_2 . Všechny vrstvy mají přibližně stejnou šířku (cca 42 μm), takže celý vzorek má rozměry cca 2 x 2,5 x 25 mm (š x v x d). Během testování těchto materiálů bylo sledováno šíření trhlin, které se iniciovaly v rohu vpichu po indentoru, viz obr. 7.



Obr. 7 Změna směru šíření trhliny, vyvolané vpichem indentoru, na rozhraní mezi dvěma vrstvami keramiky (publikováno se svolením H. Hadraby)

Na základě informací dostupných v citované literatuře [13] a [14] byl vytvořen numerický model keramického laminátu s trhlinou. Úloha byla řešena jako rovinná a z důvodu vysokých nároků na lokální zjemnění sítě v okolí vrcholu trhliny při řešení problémů lomové mechaniky byl pro potřebu numerického řešení zredukován

původní počet vrstev reálného vzorku na počet nižší, a to tak, aby se nezměnila napjatost v okolí defektu a aby nedošlo k ovlivnění numerických výsledků.

Byly řešeny dva možné případy, tzn. přítomnost trhliny jak ve vrstvě Al_2O_3 , tak ve vrstvě ZrO_2 , a to vždy pro tři zvolené počáteční orientace trhliny vzhledem k rozhraní v závislosti na dostupných experimentálních datech. V numerických simulacích byly použity materiálové charakteristiky jednotlivých vrstev uvedené v tab. IV, převzato z [14].

Tab. IV Materiálové charakteristiky vrstev keramického laminátu

MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY	keramika	
	Al_2O_3	ZrO_2
modul pružnosti v tahu [MPa]	$3,8 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$
Poissonovo číslo [-]	0,26	0,31
součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$10,3 \cdot 10^{-6}$

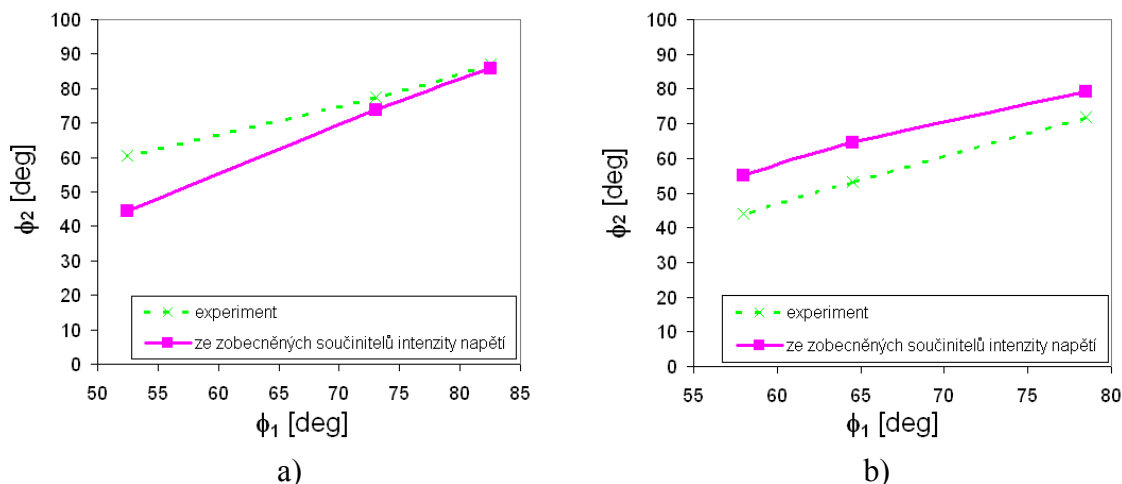
Numerický model laminátu s trhlinou byl zatížen pouze reziduálními napětími, která vznikají v jednotlivých vrstvách v důsledku výrobního procesu (ochlazením ze slinovací teploty $1500\text{ }^\circ\text{C}$ na pokojovou teplotu). Poznamenejme, že u velkého množství keramických laminátů jsou to právě alternující reziduální napětí v jednotlivých vrstvách, která zajišťují lepší lomové vlastnosti těchto materiálů. Reziduální napětí mohou způsobit jednak vychýlení trhliny za rozhraním (případně může dojít i k rozdvojení trhliny), což zvýší lomovou energii tohoto laminátu, nebo mohou dokonce způsobit zastavení trhliny v místě rozhraní. U laminátu typu $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ byla pozornost věnována směru šíření trhliny, tedy vlivu reziduálních napětí na vychýlení trhliny z jejího původního směru a tím větší absorpci energie trhliny šířící se z rozhraní.

Poté, co bylo aplikováno několik kritérií, se pro odhad směru dalšího šíření trhliny z rozhraní jako vhodné ukázalo kritérium založené na analogii s homogenním materiálem a vztahu:

$$\text{tg}\gamma = \frac{H_{II}}{H_I}, \quad (7)$$

kde H_I a H_{II} jsou zobecněné součinitele intenzity napětí pro zatěžovací módy I a II.

Výsledky zjištěné tímto postupem jsou na obr. 8, kde lze vidět poměrně dobrou shodu s experimentálně určenými směry šíření trhliny z rozhraní, a to i přes jisté zjednodušující předpoklady provázející odvození vztahu (7) a především separaci jednotlivých zatěžovacích módů.



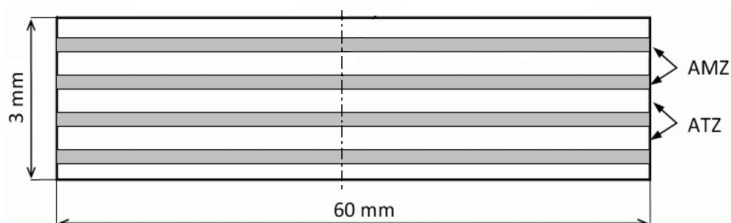
Obr. 8 Směry šíření trhliny po průchodu rozhraním ϕ_2 v závislosti na počáteční orientaci trhliny ϕ_1 určené ze vztahu (7); a) rozhraní $Al_2O_3 - ZrO_2$, b) rozhraní $ZrO_2 - Al_2O_3$

Mírný nesoulad výsledků může být způsoben použitím dvojrozměrného modelu při numerickém řešení pomocí MKP. Při uvažování tohoto zjednodušení není v modelu zachycen reálný poloeliptický tvar trhliny, což může mít vliv na dosažené výsledky. Další výzkum týkající se lomového chování tohoto typu laminátů může být tedy zaměřen tímto směrem.

6.2.2 Keramický laminát typu ATZ/AMZ

Druhý studovaný laminát je také typu $Al_2O_3 - ZrO_2$, ale liší se kromě geometrie, viz obr. 9, také složením jednotlivých vrstev. Obě vrstvy se skládají vždy ze směsi obou složek, přičemž jedna vrstva je tvořena materiálem Al_2O_3 s pětiprocentním objemovým podílem tetragonálního ZrO_2 (materiál $Al_2O_3/5\text{vol.}\%t\text{-}ZrO_2$ dále označovaný jako ATZ) a druhá vrstva se skládá z materiálu Al_2O_3 tentokrát s třicetiprocentním objemovým množstvím monoklinické složky ZrO_2 (materiál $Al_2O_3/30\text{vol.}\%m\text{-}ZrO_2$ dále označovaný jako AMZ).

Co se týče geometrie studovaného laminátu, jedná se o pravidelně se střídajících devět vrstev, přičemž tloušťka vrstev z materiálu ATZ je $t_{ATZ} = 0,52$ mm a tloušťka vrstev z materiálu AMZ je $t_{AMZ} = 0,1$ mm. Celková tloušťka laminátu je tedy 3 mm, jak naznačuje obr. 9.



Obr. 9 Schéma keramického laminátu typu AMZ/ATZ

Stejně jako u řady dalších keramických laminátů i u tohoto typu se využívá ke zlepšení jeho lomových vlastností střídání vrstev s různými mechanickými vlastnostmi, především s rozdílnými koeficienty teplotní roztažnosti, viz tab. V.

Tab. V Materiálové charakteristiky studovaného keramického laminátu, viz např. [2] nebo [4]

MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY	keramika	
	ATZ	AMZ
modul pružnosti v tahu [MPa]	$3,9 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^5$
Poissonovo číslo [-]	0,22	0,22
součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]	$9,82 \cdot 10^{-6}$	$8,02 \cdot 10^{-6}$
lomová houževnatost [$MPa \cdot m^{1/2}$]	3,2	2,6
pevnost [MPa]	422	90

Důsledkem jsou pak během výrobního procesu vznikající reziduální napětí v jednotlivých vrstvách, která mohou mít při správném návrhu laminátu pozitivní vliv při šíření trhliny v takovémto tělese. Hodnoty reziduálních napětí v jednotlivých vrstvách ATZ a AMZ keramického laminátu určené pomocí numerických simulací a analytických vztahů jsou srovnány v tab. VI.

Tab. VI Reziduální napětí v jednotlivých vrstvách keramického laminátu určená na základě numerických simulací a analytických vztahů

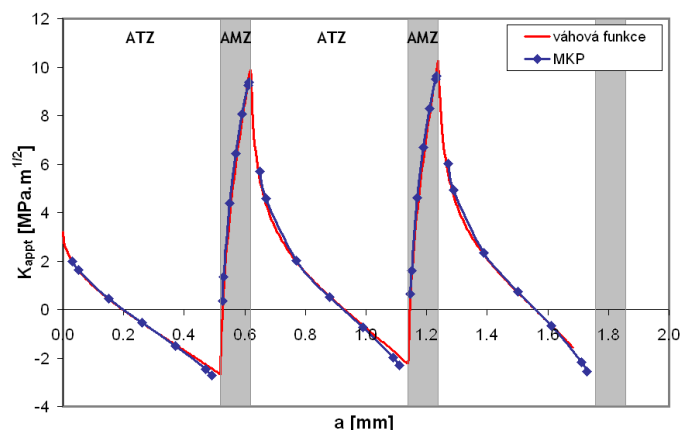
Numerické simulace (MKP)		Analytické vztahy	
$\sigma_{res,ATZ}$ [MPa]	$\sigma_{res,AMZ}$ [MPa]	$\sigma_{res,ATZ}$ [MPa]	$\sigma_{res,AMZ}$ [MPa]
110,11	-715,72	109,95	-715,83

Právě v důsledku přítomnosti vysokých tlakových reziduálních napětí ve vrstvách AMZ (viz tab. VI) dochází v této oblasti k nárůstu tzv. zdánlivé lomové houževnatosti laminátu K_{app} . Platí totiž, že:

$$K_{app}(a) = K_C - K_{res}(a) , \quad (8)$$

kde K_C je lomová houževnatost materiálu vrstvy a $K_{res}(a)$ je součinitel intenzity napětí příslušející namáhání reziduálními napětími σ_{res} (určený pro příslušnou délku trhliny pomocí metody konečných prvků nebo metody váhových funkcí), který v důsledku tlakových reziduálních napětí ve vrstvách AMZ může nabývat záporných hodnot.

Závislost zdánlivé lomové houževnatosti K_{app} na délce trhliny získaná ze vztahu (8) je na obr. 10, kde lze také vidět zmiňovaný vliv reziduálních napětí ve vrstvách AMZ na nárůst zdánlivé lomové houževnatosti keramického laminátu. Zatímco jednotlivé vrstvy mají lomovou houževnatost okolo $3 \text{ MPa} \cdot m^{1/2}$ (viz tab. V), vrstevnatý laminát má hodnotu K_{app} až trojnásobnou (viz druhé rozhraní laminátu mezi vrstvami AMZ a ATZ na obr. 10).



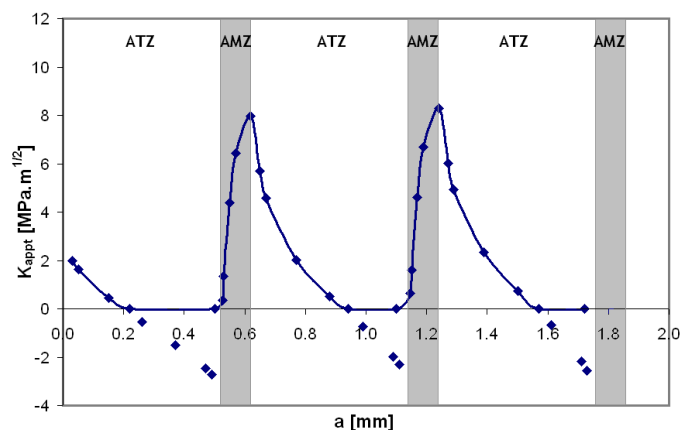
Obr. 10 Zdánlivá lomová houževnatost v jednotlivých vrstvách keramického laminátu určená pomocí numerických simulací a metody váhových funkcí

Jak již bylo komentováno v dřívějším textu, v blízkosti rozhraní může narůstat nepřesnost řešení a pro případ rozhraní je dokonce nutné použít zobecněné postupy LELM. Pro zpřesnění hodnot v blízkosti rozhraní byly na základě kritéria stability založeného na hodnotě faktoru hustoty deformační energie odhadnuty hodnoty K_{apppt} pro první čtyři rozhraní. Byla tedy modelována kolmá trhlinka v keramickém laminátu zatíženém reziduálními napětími s vrcholem na rozhraní mezi jednotlivými vrstvami. Z hodnot zobecněných součinitelů intenzity napětí H byly pomocí kritéria stability vypočteny hodnoty efektivní hodnoty součinitele intenzity napětí pro trhlinku na rozhraní a pomocí vztahu (8) byly určeny výsledné velikosti K_{apppt} . Tyto jsou uvedeny v tab. VII, kde je vidět taktéž dobrá shoda hodnot zdánlivé lomové houževnatosti pro první a druhé rozhraní typu AMZ/ATZ určených jednak na základě numerických simulací a jednak pomocí experimentu [5].

Tab. VII Hodnoty zdánlivé lomové houževnatosti K_{apppt} pro kolmou trhlinku a první čtyři rozhraní keramického laminátu; ¹určené na základě numerických simulací pomocí kritéria stability založeného na hodnotě faktoru hustoty deformační energie, ²určené experimentálně [5]

Délka trhliny a [mm]	K_{eff} [MPa.m ^{1/2}]	K_{apppt}^1 [MPa.m ^{1/2}]	K_{apppt}^2 [MPa.m ^{1/2}]
0,52 (rozhraní ATZ/AMZ)	2,5	0,1	-
0,62 (rozhraní AMZ/ATZ)	-4,8	8,0	7,1
1,14 (rozhraní ATZ/AMZ)	2,2	0,4	-
1,24 (rozhraní AMZ/ATZ)	-5,1	8,3	8,1

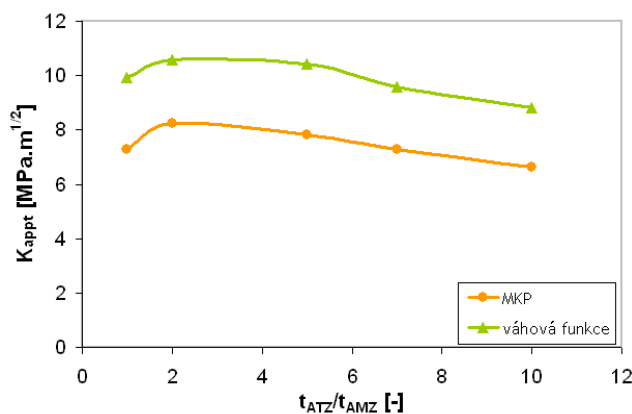
S ohledem na data uvedená v tab. VII se jeví jako vhodné upravit původní graf závislosti K_{apppt} na délce trhliny na obr. 10. Kromě zahrnutí hodnot určených pro trhlinku na prvních čtyřech rozhraních se liší nový graf také tím, že nepřipouští záporné hodnoty zdánlivé lomové houževnatosti, viz obr. 11.



Obr. 11 Zdánlivá lomová houževnatost v jednotlivých vrstvách keramického laminátu za předpokladu zahrnutí hodnot K_{appt} určených pro trhlinu na prvních čtyřech rozhraních a omezení se pouze na kladné hodnoty zdánlivé lomové houževnatosti

Jak je vidět na obr. 10 i 11, je zdánlivá lomová houževnatost studovaného keramického laminátu prakticky stejná pro všechna rozhraní typu AMZ/ATZ a nezávisí tedy na absolutní délce trhliny. Mj. také s ohledem na tuto skutečnost, byla pro další studie týkající se optimalizace geometrie keramického laminátu s ohledem na jeho lomovou houževnatost zvolena jako reprezentativní hodnota K_{appt} pro celý systém hodnota na jeho druhém rozhraní (tzn. na rozhraní typu AMZ/ATZ).

Optimalizační proces byl proveden na základě jak numerických simulací, tak pomocí váhových funkcí. Snahou bylo nalézt optimální poměr tloušťek jednotlivých vrstev, tzn. parametr $\rho = t_{ATZ}/t_{AMZ}$, tak, aby byla maximalizována hodnota K_{appt} určená na rozhraní typu AMZ/ATZ, jak bylo vysvětleno výše. Testovány byly modelové poměry 1:1, 2:1, 5:1, 7:1 a 10:1. Získané závislosti jsou na obr. 12.

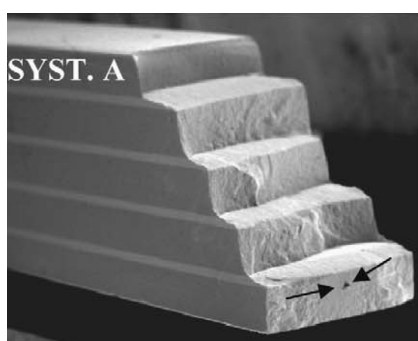


Obr. 12 Zdánlivá lomová houževnatost keramického laminátu definovaná jako K_{appt} na rozhraní typu AMZ/ATZ a určená pomocí numerických simulací (MKP) a metody váhových funkcí

Jak je vidět z obr. 12, ačkoli aplikované metody (MKP a váhové funkce) nedávají kvantitativně stejné výsledky, kvalitativně co do trendů jsou křivky totožné a je tedy možné na jejich základě navrhnout optimální design keramického laminátu tak, aby bylo dosaženo jeho maximální zdánlivé lomové houževnatosti. U konkrétního studovaného laminátu typu ATZ/AMZ se jeví jako ideální poměr tloušťek t_{ATZ}/t_{AMZ} jednotlivých vrstev přibližně 2:1 nebo mírně vyšší. Lomová houževnatost takto

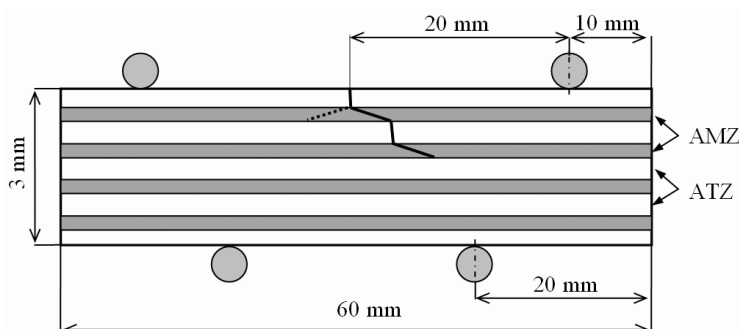
navrženého laminátu může dosahovat až trojnásobku hodnot lomových houževnatostí jednotlivých složek.

Zatímco předchozí text byl věnován výhradně mechanismu zhouževnatění keramického laminátu vlivem působení reziduálních napětí jakožto bariéry proti šíření trhliny a v souvislosti s tím nárůstu tzv. zdánlivé lomové houževnatosti, následující část bude věnována jinému typu zhouževnatění, které je charakteristické pro studovaný keramický kompozit. K tomuto typu zhouževnatění dochází v důsledku tzv. schodovitého mechanismu šíření trhliny přes jednotlivé vrstvy laminátu, který byl experimentálně pozorován na keramických vzorcích a dokumentován např. v pracích [3], [6], viz obr. 13. V souvislosti s tímto jevem dochází ke zvýšení odolnosti celého keramického systému proti šíření trhliny, neboť během šíření trhliny ve vychýleném směru dochází k větší absorpci její energie.



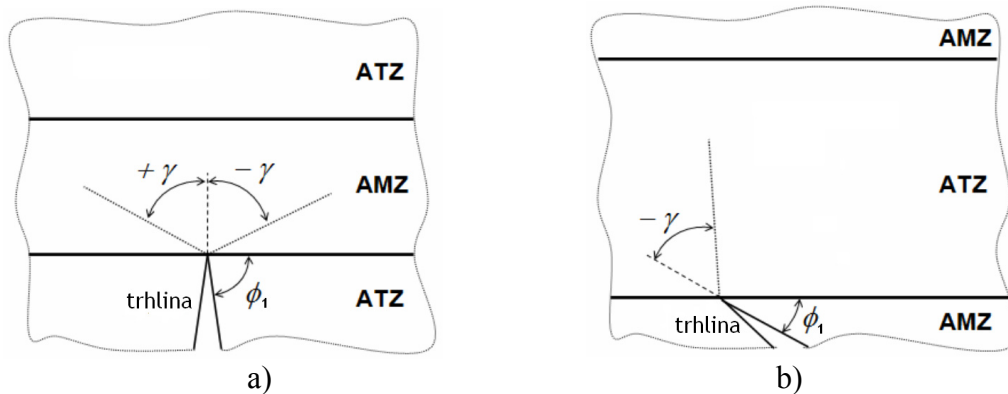
Obr. 13 Schodovitý mechanismus šíření trhliny pozorovaný v keramickém laminátu typu ATZ/AMZ (publikováno se svolením R. Bermeja [6])

Byly studovány změny směru šíření trhliny na prvních několika rozhraních laminátu, pro jejichž odhad byla využita dvě kritéria, a to kritérium MTS (maximálních tangenciálních napětí) a kritérium SED (minimální hustoty deformační energie). Kromě zatížení reziduálními napětími vznikajícími v jednotlivých vrstvách v důsledku výrobního procesu byly u laminátu současně aplikovány okrajové podmínky čtyřbodového ohybu podle obr. 14.



Obr. 14 Experimentální uspořádání zkoušky čtyřbodovým ohybem simulované pomocí MKP na keramickém laminátu s vnější trhlinou

Trhlina v první vrstvě (ATZ s tahovými reziduálními napětími) byla modelována jako téměř kolmá k rozhraní a bylo sledováno její chování (změna směru šíření) při dosažení prvních čtyř rozhraní (použitá symbolika viz obr. 15).

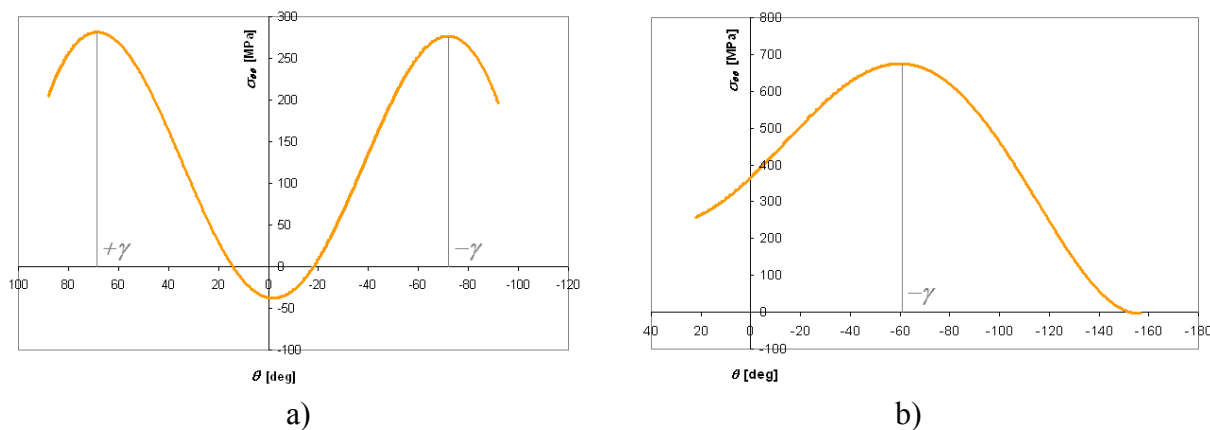


Obr. 15 Schéma a použité označení pro trhlinu s vrcholem: a) na rozhraní typu ATZ/AMZ, b) na rozhraní typu AMZ/ATZ

Obecně byly u studovaných laminátů zjištěny 2 rozdílné tendence v chování trhliny na rozhraní. Na rozhraní typu ATZ/AMZ, viz obr. 15a), kdy se trhlinka šíří do materiálu s tlakovými reziduálními napětími, může snadno dojít k bifurkaci trhliny. Alespoň to naznačují průběhy vyšetřovaných veličin (tangenciálního napětí i hustoty deformační energie) před vrcholem trhliny, viz obr. 16a) pro názornost.

Z obr. 16a) je zřejmé, že tangenciální napětí dosahuje pro trhlinu na rozhraní typu ATZ/AMZ svého lokálního maxima ve dvou různých směrech, které jsou téměř symetrické vzhledem k původnímu směru šíření trhliny, což podporuje teorii o bifurkaci trhliny na rozhraní tohoto typu a současně je v souladu s experimentálním pozorováním tohoto jevu, viz např. [2]. Zda dojde k bifurkaci trhliny, či zda se trhlinka pouze vychýlí z původního směru nebylo předmětem zájmu této práce, ale mohlo by být zajímavým námětem analýz do budoucna.

Pro úplnost je uveden i grafický průběh tangenciálních napětí před vrcholem trhliny pro druhý typ rozhraní (AMZ/ATZ), kdy se trhlinka šíří do materiálu s tahovými reziduálními napětími. Ze získaného průběhu na obr. 16b) je vidět, že na tomto typu rozhraní určuje směr dalšího šíření trhliny pouze jeden lokální extrém studované veličiny (tangenciálního napětí $\sigma_{\theta\theta}$ případně hustoty deformační energie w). Poloha tohoto lokálního extrému je v tomto případě blízká směru kolmému k rozhraní, což souvisí s tím, že se trhlinka ve vrstvě ATZ šíří kolmo ke směru tahových napětí.



Obr. 16 Průběhy tangenciálních napětí před vrcholem trhliny: a) pro rozhraní typu ATZ/AMZ; b) pro rozhraní typu AMZ/ATZ

Zatímco původní laminát měl poměr tloušťek jednotlivých vrstev $\rho = t_{ATZ}/t_{AMZ}$ roven přibližně 5:1, byly nově studovány i tři další modelové konfigurace s poměrem tloušťek jednotlivých vrstev 2:1, 7:1 a 10:1. Přitom byla zachována konstantní celková tloušťka laminátu 3 mm.

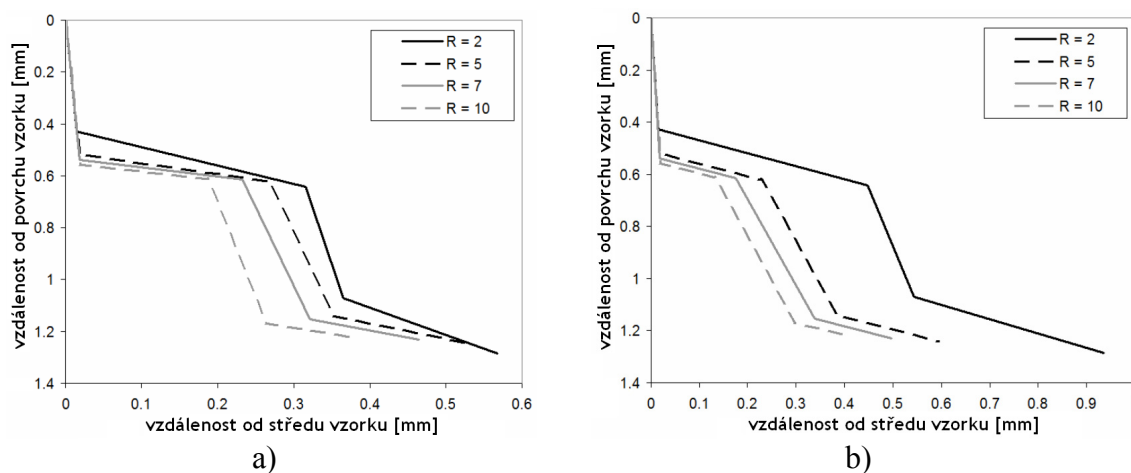
Při odhadech směru dalšího šíření trhliny ϕ_2 z prvního rozhraní typu ATZ/AMZ pomocí obou kritérií a pro všechny uvedené poměry tloušťek jednotlivých vrstev ρ byla jako počáteční orientace trhliny zvolena hodnota $\phi_1 = 88^\circ$ (tedy trhlina téměř kolmá k rozhraní). Jak lze vidět z výsledků uvedených v tab. VIII, nemá poměr tloušťek jednotlivých vrstev ρ výrazný vliv na směr dalšího šíření trhliny z rozhraní typu ATZ/AMZ. Veškeré výsledné hodnoty se pohybují v rozsahu 20-30°.

Tab. VIII Směry dalšího šíření trhliny ϕ_2 z prvního rozhraní ATZ/AMZ odhadnuté na základě kritérií MTS a SED pro různé poměry tloušťek jednotlivých vrstev ρ

Poměr tloušťek jednotlivých vrstev ρ (t_{ATZ}/t_{AMZ})		2:1	5:1	7:1	10:1
ϕ_2 [deg]	MTS kritérium	$\pm 35,5$	$\pm 22,7$	$\pm 19,8$	$\pm 18,4$
	SED kritérium	$\pm 25,3$	$\pm 26,3$	$\pm 26,3$	$\pm 26,3$

Závěrečným shrnutím trajektorií trhliny pro studované poměry tloušťek jednotlivých vrstev získané na základě numerických simulací vždy do jednoho grafu pro příslušné kritérium lze získat schémata na obr. 17.

Především na základě výsledků na obr. 17a) a výsledků pro MTS kritérium v tab. VIII se dá říci, že pro větší poměry tloušťek jednotlivých vrstev ρ roste i odklon trhliny od původního směru ve vrstvách s tlakovými reziduálními napětími. Ačkoli toto je na první pohled žádoucí jev, který může zvýšit odolnost laminátu proti šíření trhliny (čím větší odklon od původního směru, tím déle se může trhlina ve vrstvě za rozhraním šířit než dosáhne dalšího rozhraní), v kombinaci s odpovídající příliš malou tloušťkou vrstvy s tlakovými reziduálními napětími je dráha trhliny ve vrstvě za rozhraním ve skutečnosti kratší. Při návrhu keramických laminátů je tedy v tomto ohledu nutná jistá optimalizace.



Obr. 17 Schématické znázornění výsledné trajektorie trhliny šířící se přes první čtyři vrstvy keramického laminátu pro poměry tloušťek jednotlivých vrstev 2:1, 5:1, 7:1 a 10:1 získané pomocí numerických simulací a aplikace a) MTS kritéria, b) SED kritéria

Poznamenejme na závěr, že další zvyšování poměru tloušťek jednotlivých vrstev ρ nad hodnotu 10:1 nevede k výraznějším změnám ve výsledné trajektorii trhliny v laminátu a z praktického pohledu nemají tak vysoké poměry tloušťek jednotlivých vrstev smysl.

7 ZÁVĚR

Cílem disertační práce bylo popsat chování trhliny šířící se v okolí, respektive přes rozhraní dvou různých materiálů a na základě získaných výsledků navrhnout postupy hodnocení vlivu materiálového složení a geometrického uspořádání vrstevnatého kompozitu na jeho odolnost proti lomově mechanickému porušování.

Kromě toho, že disertační práce obsahuje hodnotící rešerši týkající se současného poznání v oblasti kritérií stability pro obecné singulární koncentrátoři napětí, její součástí je také přehledné shrnutí a vysvětlení kritérií stability odvozených v rámci několikaletého výzkumu v oblasti zobecněné lomové mechaniky na Ústavu fyziky materiálů AV ČR, v. v. i. v Brně. Dílčí závěry formulované v rámci výzkumu během autorčina doktorského studia jsou rozděleny na dvě oblasti.

7.1 TEORETICKÉ STUDIE

- ⇒ S využitím metody konečných prvků byl navržen spolehlivý numerický model umožňující výpočet pole napětí a posuvů v okolí vrcholu trhliny šířící se v blízkosti a přes rozhraní dvou elastických materiálů. Byla sledována citlivost výsledků na volbu sítě MKP a nalezena optimální velikost prvků v oblasti vrcholu trhliny zaručující spolehlivé výsledky.
- ⇒ Byla navržena metodika umožňující stanovení lomově mechanických parametrů pro trhlínu s vrcholem v blízkosti a na materiálovém rozhraní.
- ⇒ Na základě navržených postupů byly stanovovány hodnoty součinitele a zobecněného součinitele intenzity napětí pro různé geometrické a materiálové konfigurace.
- ⇒ Byla diskutována nepřesnost hodnot součinitelů intenzity napětí v těsné blízkosti rozhraní a byla navržena metoda pro odhad efektivního součinitele intenzity napětí K_{eff} pro oblast materiálového rozhraní.
- ⇒ Byla aplikována vybraná kritéria stability a diskutována jejich vhodnost pro dané problémy.
- ⇒ Na základě analogie s trhlínou v homogenním materiálu bylo navrženo kritérium pro odhad změny směru šíření trhliny na rozhraní dvou materiálů.
- ⇒ Zdůrazněna byla nutnost vhodné volby délkového parametru r , resp. d , ve které jsou kritéria stability aplikována, a byla citována a testována doporučení dostupná v literatuře.

7.2 PRAKTICKÉ APLIKACE

Další závěry byly formulovány v rámci aplikace navržené metodiky pro hodnocení součástí s trhlinami na konkrétní praktické aplikace, tj. v tomto případě na vícevrstvé polymerní trubky a keramické lamináty.

7.2.1 Vícevrstvé polymerní trubky

- ⇒ Byly navrženy dva zkušební vzorky pro laboratorní měření lomové houževnatosti vícevrstvých polymerních trubek.
- ⇒ Pro oba nehomogenní zkušební vzorky, stejně jako pro reálnou trubku byly stanoveny kalibrační funkce usnadňující určování lomové houževnatosti daných materiálů v laboratorních podmínkách.
- ⇒ Na základě dvouparametrové lomové mechaniky byla diskutována přenositelnost parametrů určených na zkušebních vzorcích na reálnou trubku a ukázáno, že v případě navržených nehomogenních vzorků jsou naměřené hodnoty lomové houževnatosti konzervativní.
- ⇒ Pomocí vybraných kritérií stability byly stanoveny hodnoty kritických zatížení pro šíření trhliny přes materiálové rozhraní.
- ⇒ Provedené analýzy umožňují formulovat doporučení, která mohou přispět k vyšší odolnosti vícevrstvých polymerních trubek proti nestabilnímu šíření trhliny.

7.2.2 Keramické lamináty

- ⇒ Bylo ukázáno, že reziduální napětí vznikající u keramických laminátů v důsledku jejich výroby mohou mít příznivý vliv na jejich lomové vlastnosti. Přitom může existovat více různých mechanismů zhouževnatění.
- ⇒ Na základě postupů zobecněné LELM byla odhadnuta hodnota zdánlivé lomové houževnatosti keramického laminátu. Vypočítané hodnoty jsou v dobré shodě s publikovanými daty určenými experimentálně.
- ⇒ Na základě numerických simulací, stejně jako pomocí metody váhových funkcí byl navržen optimální design keramického laminátu s ohledem na dosažení jeho maximální lomové houževnatosti.
- ⇒ Bylo ukázáno, že u mechanismu zhouževnatění vlivem „schodovitého“ mechanismu šíření trhliny přes jednotlivé vrstvy laminátu je při optimalizaci laminátu nutné najít rovnováhu mezi odklonem trhliny na rozhraní a poměrem tloušťek jednotlivých vrstev tak, aby byla maximalizována dráha trhliny ve vrstvách s tlakovými reziduálními napětími.

Předložená disertační práce byla vypracována za finanční podpory grantů, na jejichž řešení se autorka podílela:

- **Fondu vědy FSI č. BD1373005** “Šíření trhlin ve vrstevnatých kompozitech”
- **GA AV ČR č. 1QS200410502** “Vlastnosti konstrukčních materiálů vyvíjených a v krátkodobém horizontu použitelných v dopravě, zdravotnictví a energetice”
- **GA AV ČR č. KJB200410803** “Zobecnění lineární elastické lomové mechaniky na problémy šíření trhlin v nehomogenních materiálech”
- **GA ČR č. 106/04/P084** “Vliv rozhraní dvou materiálů na šíření únavových trhlin”
- **GA ČR č. 101/05/0227** “Studium lomového chování kompozitních trubek z polyolefinů”
- **GA ČR č. 101/05/0320** “Řešení obecných koncentrátorů napětí v anisotropních heterogenních prostředích pomocí kombinace MKP a techniky spojitě rozložených dislokací”
- **GA ČR č. 106/05/H008** “Víceúrovňový design pokrokových materiálů”
- **GA ČR č. 106/06/P239** “Vliv volného povrchu na šíření únavové trhliny”
- **GA ČR č. 106/07/1284** “Houževnatost polyolefinových kompozitů se submikroskopickými částicemi”
- **GA ČR č. 106/08/1409** “Role struktury sesít'ované polymerní matrice v částicovém kompozitu. Víceúrovňové modelování a experimentální ověření”
- **GA ČR č. 101/09/J027** “Souvislost mezi strukturálními změnami, rozvojem poškození a šířením trhlin ve svařovaných polymerních součástech”
- **GA ČR č. 106/09/0279** “Mechanismy lomového porušování vrstevnatých polymerních prostředí”
- **GA ČR č. 106/09/H035** “Víceúrovňový design pokrokových materiálů”

8 LITERATURA

- [1] Bareš, P. *Analýza šíření trhliny přes rozhraní dvou různých materiálů: disertační práce*. Brno: VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, 2007.
- [2] Bermejo, R.; Baudín, C.; Moreno, R.; Llanes, L.; Sánchez-Herencia, A. J. Processing optimisation and fracture behaviour of layered ceramic composites with highly compressive layers. *Composites Science and Technology*. 2007, vol. 67, pp. 1930-1938.
- [3] Bermejo, R.; Ceseracciu, L.; Llanes, L.; Anglada, M. Fracture of layered ceramics. *Key Engineering Materials*. 2009, vol. 409, pp. 94-106.
- [4] Bermejo, R.; Pascual, J.; Lube, T.; Danzer, R. Optimal strength and toughness of Al₂O₃-ZrO₂ laminates designed with external or internal compressive layers. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008, vol. 28, pp. 1575-1583.

- [5] Bermejo, R.; Torres, Y.; Baudín, C.; Sánchez-Herencia, A. J.; Pascual, J.; Anglada, M.; Llanes, L. Threshold strength evaluation on an Al₂O₃-ZrO₂ multilayered system. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007, vol. 27, pp. 1443-1448.
- [6] Bermejo, R.; Torres, Y.; Sánchez-Herencia, A. J.; Baudín, C.; Anglada, M.; Llanes, L. Residual stresses, strength and toughness of laminates with different layer thickness ratios. *Acta Materialia*. 2006, vol. 54, pp. 4745-4757.
- [7] Bogy, D. B. On the plane elastostatic problem of a loaded crack terminating at a material interface. *Journal of Applied Mechanics*. 1971, vol. 38, pp. 911-918.
- [8] Chiang, C. R. On the stress intensity factors of crack near an interface between two media. *International Journal of Fracture*. 1991, vol. 47, pp. R55-R88.
- [9] Delale, F.; Erdogan, F. The crack problem for nonhomogeneous plane. *International Journal of Applied Mechanics*. 1983, vol. 50, pp. 609-614.
- [10] Fenner, D. N. Stress singularities in composite materials with an arbitrarily oriented crack meeting an interface. *International Journal of Fracture*. 1976, vol. 12, pp. 705-721.
- [11] Gröger, R. Integral methods for determination of fracture characteristics of the general stress concentrators. *Sborník konference Aplikovaná mechanika 2002*. TU Ostrava, 2002.
- [12] Gröger, R.; Náhlík, L. Výpočty lomových parametrů obecných koncentrátorů napětí: II. Integrované formulace výpočtu lomových parametrů pro materiálově nehomogenní tělesa. *Sborník semináře Únava a lomová mechanika 2002*. Žinkovy, 2002.
- [13] Hadraba, H.; Klimeš, J.; Máca, K. Crack propagation in layered Al₂O₃/ZrO₂ composites prepared by electrophoretic deposition. *Journal of Materials Science*. 2007, vol. 42, pp. 6404-6411.
- [14] Hadraba, H.; Máca, K.; Cihlář, J. Electrophoretic deposition of alumina and zirconia – II. Two-component systems. *Ceramics International*. 2004, vol. 30, no. 6, pp. 853-865.
- [15] He, M.-Y.; Hutchinson, J. W. Crack deflection at an interface between dissimilar elastic materials. *International Journal of Solids Structures*. 1989, vol. 25, no. 9, pp. 1053-1097.
- [16] Knésl, Z.; Klusák, J.; Náhlík, L. Crack initiation criteria for singular stress concentrations – part I: A universal assessment of singular stress concentrations. *Engineering Mechanics*. 2007, vol. 14, no. 6, pp. 399-408.
- [17] Knésl, Z.; Náhlík, L.; Bareš, B. Crack initiation criteria for singular stress concentrations – part IV: Applications to fracture of coated structures. *Engineering Mechanics*. 2008, vol. 15, no. 4, p. 1-8.
- [18] Knésl, Z.; Náhlík, L.; Radon, L. C. Influence of interface on fatigue threshold values in elastic bimaterials. *Computational Materials Science*. 2003, vol. 28, pp. 620-627.
- [19] Lin, K. Y.; Mar, J. W. Finite element analysis of stress intensity factors for cracks at bi-material interface. *International Journal of Fracture*. 1976, vol. 12, pp. 521-531.
- [20] Meguid, S. A.; Tan, M.; Zhu, Z. H. Analysis of cracks perpendicular to biomaterial interfaces using a novel finite element. *International Journal of Fracture*. 1995, vol. 73, pp. 1-23.
- [21] Náhlík, L. *Šíření únavových trhlin v okolí rozhraní dvou elastických materiálů: disertační práce*. Brno: VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, 2002.
- [22] Náhlík, L.; Knésl, Z.; Klusák, J. Crack initiation criteria for singular stress concentrations – part III: An application to a crack touching a bimaterial interface. *Engineering Mechanics*. 2008, vol. 15, no. 2, pp. 99-114.
- [23] Profant, T.; Ševeček, O.; Kotoul, M. Calculation of *K*-factor and *T*-stress for cracks in anisotropic bimaterials. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008, vol. 75, pp. 3707-3726.

- [24] Qian, Z. Q. On the evaluation of wedge corner stress intensity factors of bi-materials joints with surface tractions. *Computers and Structures*. 2001, vol. 79, pp. 53-64.
- [25] Qian, Z. Q.; Akisanya, A. R. Wedge corner stress behaviour of bonded dissimilar materials. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 1999, vol. 32, pp. 209-222.
- [26] Sih, G. C. A special theory of crack propagation. In: *Mechanics of Fracture*. Leyden: Noordhoff International Publishing, 1977.
- [27] Sih, G. C. *Mechanics of fracture I: Methods of analysis and solutions of crack problems*. Leyden: Noordhoff International Publishing, 1973.
- [28] Sih, G. C.; Ho, J. W. Sharp notch fracture strength characterized by critical energy density. *Journal of Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 1991, vol. 16, pp. 179-214.
- [29] Sih, G. C.; Moyer Jr., E. T.; Gdoutos, E. E. Discussion "The Mises elastic-plastic boundary as the core region in fracture criteria" by P.S. Theocaris and P. Andrianopoulos. *Engineering Fracture Mechanics*. 1983, vol. 18, no. 3, pp. 731-733.
- [30] Sinclair, G. B.; Okajima, M.; Griffin, J. H. Path independent integrals for computing stress intensity factors at sharp notches in elastic plates. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*. 1984, vol. 20, pp. 999-1008.
- [31] Stern, M.; Soni, M. L. On the computation of stress intensities at fixed-free corners. *International Journal of Solids of Structures*. 1976, vol. 12, pp. 331-337.
- [32] Susmel, L. The theory of critical distances: a review of its applications in fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008, vol. 75, pp. 1706-1724.
- [33] Susmel, L.; Taylor, D. On the use of the theory of critical distances to predict static failures in ductile metallic materials containing different geometrical features. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008, vol. 75, pp. 4410-4421.
- [34] Susmel, L.; Taylor, D. The theory of critical distances to predict static strength of notched brittle components subjected to mixed-mode loading. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008, vol. 75, pp. 534-550.
- [35] Tilbrook, M. T.; Moon, R. J.; Hoffman, M. Crack propagation in graded materials. *Composites Science and Technology*. 2005, vol. 65, pp. 201-220.
- [36] Vlk, M.; Florian Z. *Mezní stavy a spolehlivost*. 2. vydání. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 2007.

9 SEZNAM AUTORČINÝCH PUBLIKACÍ

- [i] Šestáková, L.; Majer, Z.; Náhlík, L.; Knésl, Z. Numerická analýza povrchové trhliny v ochranných vrstvách. *Sborník konference Inženýrská mechanika 2006*. Svratka, 2006.
- [ii] Šestáková, L. *Vliv povrchových trhlin na delaminaci povrchové vrstvy a substrátu: diplomová práce*. Brno: VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, 2006.
- [iii] Šestáková, L. Vliv povrchových trhlin na delaminaci ochranné vrstvy a podkladu. *Sborník konference Problémy lomové mechaniky VI*. Brno, 2006.
- [iv] Šestáková, L.; Náhlík, L.; Hutař, P. Delaminace ochranné vrstvy způsobená povrchovou trhlínou. *Sborník konference SEMDOK 2007*. Žilina – Súlov, Slovakia, 2007.
- [v] Šestáková, L.; Náhlík, L.; Hutař, P. Vliv rozhraní vrstevnatého kompozitu na směr šíření trhliny. *Sborník konference Aplikovaná mechanika 2007*. Ostrava, 2007.

- [vi] Šestáková, L.; Náhlík, L.; Hutař, P. Vliv bi-materiálového rozhraní na směr šíření trhliny ve vrstevnatém kompozitu. *Sborník konference Inženýrská mechanika 2007*. Svatka, 2007.
- [vii] Šestáková, L.; Majer, Z.; Fiedler, L.; Knésl, Z. K-Calibration of specimens used for lifetime estimation of multilayer pipes. *Proceedings of 11th Problemseminar Deformation und Bruchverhalten von Kunststoffen*. Merseburg, Germany, 2007.
- [viii] Náhlík, L.; Šestáková, L.; Hutař, P. Estimation of the crack propagation direction of a crack touching the interface between two elastic materials. *Proceedings of abstracts of conference Materials Structure and Micromechanics of Fracture 5*. Brno, 2007.
- [ix] Hutař, P.; Náhlík, L.; Šestáková, L.; Knésl, Z. Quantification of the influence of vertex singularities on crack behaviour. *Book of abstracts IWCM17*. Paris, France, 2007.
- [x] Šestáková, L.; Náhlík, L.; Hutař, P.; Knésl, Z. Fracture mechanics parameters of multilayer pipes. *Applied and Computational Mechanics*. 2007, vol. 1, no. 1, pp. 299-306.
- [xi] Šestáková, L.; Majer, Z. Numerická analýza nehomogenních vzorků používaných pro měření lomové mechanických parametrů polyethylenu. *Sborník semináře Křehký lom 2007*. Brno, 2007.
- [xii] Šestáková, L. Lomové mechanické parametry bi-materiálového tělesa. *Sborník konference Víceúrovňový design pokrokových materiálů 2007*. Brno, 2007.
- [xiii] Nezbedová, E; Knésl, Z.; Šestáková, L.; Vlach, B. Fracture mechanics analysis of multi-layer pipes. *Proceedings of conference Fibre Reinforced Composites Conference 2007*. Port Elizabeth, South Africa, 2007.
- [xiv] Náhlík, L.; Šestáková, L.; Hutař, P. Estimation of the crack propagation direction of a crack touching the interface between two elastic materials. *Materials Science Forum*. 2008, vols. 567-568, no. 567-568, pp. 225-228.
- [xv] Šestáková, L. Šíření trhlín ve vrstevnatých kompozitech. *Sborník FSI Junior konference*. Brno, 2008.
- [xvi] Šestáková, L.; Hutař, P.; Fiedler, L.; Náhlík, L. K-kalibrace nehomogenních zkušebních těles typu C. *Sborník konference Aplikovaná mechanika 2008*. Gliwice, Poland, 2008.
- [xvii] Hutař, P.; Majer, Z.; Náhlík, L.; Šestáková, L.; Knésl, Z. The influence of particle size on the fracture toughness of PP-based particle composite. *Proceedings of abstracts of conference Mechanics of Composite Materials*. Riga, Latvia, 2008.
- [xviii] Náhlík, L.; Šestáková, L.; Hutař, P. Crack propagation in the vicinity of the interface between two elastic materials. *Proceedings of 1st African Interquadrennial ICF Conference 2008*. Algiers, Algeria, 2008.
- [xix] Hutař, P.; Majer, Z.; Knésl, Z.; Náhlík, L.; Šestáková, L.; Prod'homme, G. Computational estimation of micro-crack behaviour in polypropylene copolymer. *Proceedings of abstracts of 8th World Congress on Computational Mechanics WCCM8*. Venice, Italy, 2008.
- [xx] Náhlík, L.; Šestáková, L.; Hutař, P. Numerical investigation of stress singularities in cracked bimaterial body. *Key Engineering Materials*. 2008, vols. 385-387, pp.125-128.
- [xxi] Náhlík, L.; Šestáková, L.; Hutař, P. Estimation of apparent fracture toughness of ceramic laminates based on generalized strain energy density factor. *Proceedings of European Conference on Fracture*. Brno, 2008.
- [xxii] Náhlík, L.; Šestáková, L.; Hutař, P.; Knésl, Z. Crack propagation in the vicinity of interface between two elastic materials. *Proceedings of 5th International Conference on Fracture of Polymers, Composites and Adhesives*. Les Diablerets, Switzerland, 2008.

- [xxiii] Majer, Z.; Šestáková, L.; Náhlík, L.; Hutař, P.; Knésl, Z. Numerical analysis of a crack approaching the interface of two dissimilar materials. *Proceedings of conference Polymeric Materials P2008*. Halle/Saale, Germany, 2008.
- [xxiv] Náhlík, L.; Šestáková, L.; Hutař, P.; Knésl, Z. Estimation of the critical stress for failure of layered composite materials. *Proceedings of abstracts of 18th International Symposium on Computational Mechanics of Materials*. Beijing, China, 2008.
- [xxv] Šestáková, L. Crack propagation in the vicinity of bi-material interface: Application to multi-layer pipes. *Sborník konference Víceúrovňový design pokročilých materiálů*. Velké Bílovice, 2008.
- [xxvi] Šestáková, L.; Náhlík, L.; Hutař, P.; Knésl, Z. Crack propagation in the vicinity of the interface in layered materials. *Applied and Computational Mechanics*. 2009, vol. 3, no. 1, pp. 195-204.
- [xxvii] Hutař, P.; Majer, Z.; Náhlík, L.; Šestáková, L.; Knésl, Z. Influence of particle size on the fracture toughness of a PP-based particulate composite. *Mechanics of Composite Materials*. 2009, vol. 45, no. 3, pp. 281-286.
- [xxviii] Náhlík, L.; Šestáková, L.; Hutař, P. Crack propagation in the vicinity of the interface between two elastic materials. In: Boukharouba et al. *Damage and Fracture Mechanics*. Dordrecht: Springer Science + Business Media B.V., 2009, pp. 255-264.
- [xxix] Hutař, P.; Knésl, Z.; Nezbedová, E.; Náhlík, L.; Šestáková, L. Special fracture mechanics problems connected with multilayer plastic pipes. *Proceedings of conference SEICO 2009*. Paris, France, 2009.
- [xxx] Náhlík, L.; Šestáková, L.; Hutař, P. Estimation of apparent fracture toughness of ceramic laminates. *Computational Materials Science*. 2009, vol. 45, pp. 653-657.
- [xxxi] Šestáková, L.; Náhlík, L.; Hutař, P. Numerical estimation of crack behaviour and apparent fracture toughness of layered composites with strong interfaces. *Proceedings of International Conference on Fracture (ICF-12)*. Ottawa, Canada, 2009.
- [xxxii] Náhlík, L.; Šestáková, L.; Hutař, P. Crack propagation in laminar ceramics. Accepted for publication in *Proceedings of Crack Paths 2009*. Vicenza, Italy, 2009.
- [xxxiii] Náhlík, L.; Šestáková, L.; Hutař, P. Crack behaviour in laminar ceramics with strong interfaces. *Key Engineering Materials*. 2010, vols. 417-418, pp. 301-304 (in press).
- [xxxiv] Hutař, P.; Šestáková, L.; Knésl, Z.; Nezbedová, E.; Náhlík, L. Special fracture mechanics specimens for multilayer plastic pipes testing. *Polymer Testing*, doi:10.1016/j.polymertesting.2009.06.011.
- [xxxv] Hutař, P.; Náhlík, L.; Šestáková, L.; Ševčík, M.; Knésl, Z.; Nezbedová, E. A fracture mechanics assessment of surface cracks existing in protective layers of multilayer composite pipes. Zasláno k publikaci do časopisu *Composite Structures*.

10 CURRICULUM VITAE

Jméno a příjmení: Ing. Lucie Šestáková

Datum narození: 11.10.1982

Národnost: česká

Rodinný stav: svobodná

Adresa: Jívová 10, pošta Dolany, 783 16

Telefon: +420777596124

E-mail: sestakova.lucie@seznam.cz



VZDĚLÁNÍ:

- 2006 – Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně a Ústav fyziky materiálů Akademie věd ČR, v. v. i., Brno; obor Inženýrská mechanika - postgraduální studium
- 2001 – 2006 Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně; obor Aplikovaná mechanika - pětileté magisterské studium
- 1994 – 2001 Gymnázium ve Šternberku (Všeobecné vzdělání)

ODBORNÁ ČINNOST:

- 2009 – Vědecká pracovnice u firmy Materials Center Leoben na Institut für Struktur- und Funktionskeramik, Montanuniversität Leoben v Rakousku
- 2009 – „Junior researcher“ na rakouském projektu č. A7.4 “Mechanical reliability of LTCC components for automotive applications”
- 2009 Vyžádaná přednáška na Ústavu stavební mechaniky FAST VUT v Brně na téma „Praktické aplikace zobecněné lomové mechaniky“
- 2008 – 2009 Členka řešitelského týmu grantu GA AV ČR č. KJB200410803 “Zobecnění lineární elastické lomové mechaniky na problémy šíření trhlin v nehomogenních materiálech”
- 2007 – 2009 Členka mezioborového týmu řešitelů doktorského projektu GA ČR č. 106/05/H008 a 106/09/H035 „Víceúrovňový design pokrokových materiálů“
- 2007 Řešitelka grantu Fondu vědy FSI č. BD1373005 s názvem: „Šíření trhlin ve vrstevnatých kompozitech“
- 2007 Absolventka „Kurzů základů vědecké práce“
- 2006 – 2007 Vedoucí cvičení z předmětů Pružnost a pevnost I a Pružnost a pevnost II na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně

VĚDECKÁ OCENĚNÍ:

- 2006 Cena děkana Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně
- 2006 Cena Nadace Preciosa

11 ABSTRACT

This Ph.D. Thesis has been created under my supervisors prof. RNDr. Zdeněk Knésl, CSc. and doc. Ing. Luboš Náhlík, Ph.D. and deals with the issue of cracks propagation near and through a material interface.

The stress distribution near the interface is strongly non-homogeneous and the accuracy of common procedures for K estimation is very low and not sufficient. Moreover, in the case of a crack terminating on bi-material interface the character of the singular stress field around the crack tip changes and is of the type r^{-p} , where the stress singularity exponents $p \neq 1/2$ belongs to the interval $0 < p < 1$ and depends on the elastic constants of both materials. The proportionality constant of the singular term corresponds to the generalised stress intensity factor H .

The complete methodology of the problem solution (determination of stress singularity exponents, generalized stress intensity factors, including presentation of several stability criteria for a crack terminating at an interface) is described.

Then, theoretical results are presented in the form of general parametric analysis, but the most important part of the thesis is focused on particular applications of the methods introduced. The application part of the thesis is mainly devoted to crack propagation in multilayer polymer pipes and ceramic laminates. The estimation of the critical values for crack propagation through the material interface has been carried out and comparison with another available theories and experiments has been done.

Finally, the results published are discussed, conclusions and optimisation proposals are formulated and new research possibilities are suggested. The results and conclusions presented can facilitate the reliable life time estimation of layered materials and structures.