

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 505

ISSN 1213-418X

Stanislav Seitl

**DVOUPARAMETROVÁ
LOMOVÁ MECHANIKA:
APLIKACE PRO TESTY
NA CEMENTOVÝCH KOMPOZITECH**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav stavební mechaniky

Ing. Stanislav Seitl, Ph.D.

**DVOUPARAMETROVÁ LOMOVÁ MECHANIKA:
APLIKACE PRO TESTY NA CEMENTOVÝCH
KOMPOZITECH**

**TWO-PARAMETER FRACTURE MECHANICS:
APPLICATION ON CEMENT BASED
COMPOSITES**

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE
VĚDNÍ OBOR: KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY



BRNO 2015

KLÍČOVÁ SLOVA

faktor intenzity napětí, T-napětí, stísnění, test klínovým štípáním, třibodový ohyb trámce se zářezem, modifikovaná zkouška excentrickým tahem, kombinovaný test klínovým štípáním a třibodovým ohybem.

KEYWORDS

Stress intensity factor, T-stress, constraint, wedge splitting test, three point bending on notched beam, modified compact tension test, combination of wedge splitting and three point bending test.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE:

Originál práce je uložen v archívu PVO FAST.

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD	6
2 DVOUPARAMETROVÁ LOMOVÁ MECHANIKA	6
2.1 Dvouparametrový popis pole napětí v okolí kořene trhliny	7
2.2 Metodika dvouparametrové lomové mechaniky.....	7
3 CÍLE	8
4 VYBRANÉ METODY ZKOUŠENÍ V LOMOVÉ MECHANICE CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ	9
4.1 Zkouška tříbodový ohybem a její geometrické obměny	9
4.1.1 Vliv poměru charakteristické velikosti a délky zkušebního tělesa	10
4.2 Zkouška klínovým štípáním a její modifikace	12
4.2.1 Porovnání WST se standardizovanou zkouškou CT.....	14
4.2.2 Vliv okrajových podmínek – uvážení vertikální síly.....	16
4.3 Zkouška excentrickým tahem a její modifikace pro cementové kompozity.....	17
4.3.1 Porovnání výsledků MCT s CT	17
4.4 Kombinovaná zkouška klínovým štípáním a tříbodovým ohybem	20
5 ZÁVĚR.....	23
POUŽITÁ LITERATURA	26
SEZNAM AUTOROVÝCH PUBLIKACÍ ZAMĚŘENÝCH NA DISKUTOVANOU PROBLEMATIKU.....	28
ABSTRAKT.....	30
ABSTRACT.....	30

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení:

Stanislav Seitl

Datum a místo narození:

17. září 1975 v Přerově

Bydliště:

Větrná 614/18, 63500 Brno



Adresa do zaměstnání:

VUT v Brně, Fakulta stavební
Ústav stavební mechaniky
Veveří 331/95, 602 00 Brno
Česká republika
Tel.: 541 147 362
Fax: 541 240 996
E-mail: seitl.s@fce.vutbr.cz

Akademie věd České republiky
Ústav fyziky materiálů
Žižkova 22, 616 62 Brno
Česká republika
Tel.: 532 290 361
Fax:

E-mail: seitl@ipm.cz

Vzdělání a pedagogické a vědecké hodnosti:

- | | | |
|------|----------|---|
| 2003 | Ph.D. | Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, Specializace: Inženýrská mechanika |
| 1999 | Rotný | Základní vojenská služba, Specializace: Chemický zbrojář |
| 1998 | Ing. | Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Specializace: Učitelství matematiky a technické mechaniky pro střední školy |
| 1993 | maturita | Střední průmyslová škola Přerov |

Zaměstnání, pracovní zařazení a funkce

- | | |
|---------|---|
| Od 2010 | Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, odborný asistent |
| Od 2003 | Ústav fyziky materiálů, AVČR, v.v.i., vědecký pracovník |

Odborné a výzkumné zařazení

- | | |
|----------------|---|
| FAST-S-14-2532 | Zpřesnění vyhodnocení zkoušky štípním klínem pro určení lomových charakteristik kvazikřehkých materiálů (řešitel) |
| M100411204 | Využití termografických metod a pokročilých statistických postupů pro efektivní odhad parametrů Wöhlerovy křivky (řešitel) |
| 7AMB1-4AT012 | Vývoj nových zkušebních konfigurací pro určení vypovídajících hodnot lomových charakteristik cementových kompozitů (DeTeCon) (spoluřešitel) |
| FAST-J-13-2045 | Numerická podpora pro modifikovanou zkoušku excentrickým tahem: aplikace pro cementové kompozity (garant) |

- P104/11/0833 Odezva cementových kompozitů na únavové zatěžování: pokročilé numerické modelování a experimenty (řešitel)
- P105/11/0466 Energetické a napjatostní aspekty kvazikřehkého lomu – důsledky pro určování lomově-mechanických parametrů silikátových kompozitů (spoluřešitel)
- M100410901 Lomově mechanický popis trojrozměrných těles: numerická analýza a fyzikální význam/důsledky constraintu (řešitel)
- KJB200410901 Lom silikátových kompozitu na vzorcích z jádrových vývrtu – využití numerického modelování pro pokročilé stanovování lomových parametru (řešitel)
- 101/08/1623 Inovační postupy pro odhad zbytkové životnosti těles s únavovými trhlinami (spoluřešitel)
- 103/08/0963 Základní únavové charakteristiky a lom pokročilých stavebních materiálů (spoluřešitel)
- 101/04/P001 Vliv constraintu na prahové hodnoty součinitele intenzity napětí (řešitel)

Publikační a tvůrčí činnost

45 článků v zahraničních časopisech, 8 článků v domácích časopisech, 31 článků na světových vědeckých konferencích, 69 příspěvků ve sbornících národního nebo mezinárodních kongresů, symposií, vědeckých konferencí

Pedagogická činnost:

Bakalářské a magisterské studium

Přednášky: BD02 – **Pružnost a pevnost**, BD52/53 – **Vybrané statě ze stavební mechaniky**

Člen komise pro obhajobu diplomových prací – 2x

Vedení obhájených bakalářských prací – 2x

Vedení obhájených diplomových prací – 4x

Doktorské studium

Přednáška: CD54 – **Lomová mechanika**

Člen komise pro obhajobu disertační práce – 7 x

Školitel doktorandky v období 2010-2015; doktorandka je po úspěšném absolvování státní doktorské zkoušky a před dokončením práce

Pro Fakultu stavební, VUT v Brně: ERASMUS koordinátor:

Od 2011 Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně – Univerzita Oviedo (Maria Jesus Lamela Rey)

Od 2011 Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně – Univerzita Malaga (Pablo Polez Crespo)

Od 2012 Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně – Univerzita Ghent (Wouter de Corte)

1 ÚVOD

Většina inženýrských konstrukcí a součástí obsahuje trhliny nebo vady trhlinám podobné. V předkládané práci se zaměříme na stavební konstrukce z cementových kompozitů, kdy trhliny vznikají buď během zrání/tvrdnutí cementových kompozitů (smrštění), zvláště v případě použití některých speciálních technologií jako (provzdušnění, frézování nebo broušení povrchu, atd.), nebo se formují během životnosti konstrukce.

Popis/vyhodnocení chování trhlín v tělesech za podmínek odpovídajících situacím, ve kterých se nacházejí konstrukce v provozu, je základním cílem lomové mechaniky. Základní úvahy lomové mechaniky jsou vztaženy na trhliny, ale postupy a výpočty používané v tomto případě mají obecnější význam a lze je použít i v případech obecnějších defektů (např. strukturní vady v materiálech, stopy po povrchových úpravách apod.). Vzhledem k tomu, že existence takových defektů je objektivním jevem, nabízí lomová mechanika postup jak hodnotit návrhy konstrukcí z tohoto hlediska, a tak významně zvýšit užitnou hodnotu návrhu i provozní spolehlivost konstrukce a snížit rizika případných havárií.

Hlavním úkolem lomové mechaniky je stanovit kritéria, která určí, zda a jakým způsobem se bude za daných podmínek defekt šířit a v této souvislosti stanovit maximální kritické hodnoty aplikovaného napětí případně největší přípustnou velikost defektu. Postup při návrhu konstrukce na základě poznatků lomové mechaniky je tedy obecnější než konvenční návrhy, kdy předpokládáme, že materiál je kompaktní bez zřejmých trhlín (založen na pevnostním pojetí – např. tahová/tlaková pevnost, mez kluzu, apod.), což v řadě případů však neodpovídá skutečnosti. Vlivem přítomnosti trhlín či jiných koncentrátorů napětí a deformace (defektů) dochází nejen ke kvantitativním, ale i kvalitativním změnám, neboť zdaleka nejde jen o snížení nosného průřezu a s tím související zvýšení napětí. Použití lomové mechaniky rovněž umožňuje, v ideálním případě, přenos poznatků a informací získaných na jednoduchých zkušebních tělesech v laboratorních podmínkách na geometricky složitější konstrukční díly vystavené reálným provozním podmínkám.

Lomově mechanické parametry cementových kompozitů náležejí ke kritickým parametrům pro navrhování a dlouhodobého užívání stavebních dílců a z nich sestavených konstrukcí a pro jejich spolehlivé předpovědi reálné životnosti.

Dvoupřímá lineární elastická lomová mechanika představuje zobecnění klasického, jednopřímá přístupů a umožňuje popis vlivu multiaxiality napětí na čele trhliny tím, že používá pro hodnocení napětí v okolí vrcholu trhliny kromě singulárního členu Williamsova rozvoje i další, konstantní člen, tzv. T -napětí. V tomto přístupu je tedy pole napětí a deformací, a tím i lomové chování trhliny charakterizováno dvěma parametry.

Z praktického hlediska umožňuje použití dvoupřímá lomové mechaniky spolehlivější přenos materiálových dat popisujících růst trhlín z různých typů laboratorních těles na větší konstrukce, a tím nepochybně přispívá k jejich vyšší spolehlivosti a přesnějšímu odhadu zbytkové životnosti těchto konstrukcí a jejich dílců.

2 DVOUPŘÍMÁ LOMOVÁ MECHANIKA

Základním cílem dvoupřímá lomové mechaniky je vysvětlit a popsat vliv geometrie těles (zkušebních, reálných konstrukcí) na chování trhliny [15], [8]. Přitom se vychází z předpokladu, že chování trhliny v tělese může záviset na stupni multiaxiality napětí v okolí kořene trhliny. Jednopřímá přístup neumožňuje popsat vliv rozdílné multiaxiality napětí (vyvolané různou geometrií těles) na chování trhliny. V této souvislosti se vliv napětí označuje jako constraint efekt

(stísnění). Protože doposud neexistuje ustálený český termín pro tento jev, budeme i nadále tento termín používat.

2.1 DVOUPARAMETROVÝ POPIS POLE NAPĚTÍ V OKOLÍ KOŘENE TRHLINY

Vliv multiaxiality napětí lze (v případě křehkého lomu) dostatečně přesně popsat uvážením druhého (konstantního) členu v rozvoji pro napětí v okolí kořene trhliny. Z obecného řešení, Airiho funkce napětí vyplývá pro rozdělení napětí

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \frac{3}{2} \cos\left(\frac{1}{2}\theta\right) + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{5}{2}\theta\right) \\ \frac{5}{2} \cos\left(\frac{1}{2}\theta\right) - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{5}{2}\theta\right) \\ -\frac{1}{2} \sin\left(\frac{1}{2}\theta\right) + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{5}{2}\theta\right) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

kde T je složka napětí působící rovnoběžně s lomovými plochami trhliny.

Dvouparametrová lomová mechanika charakterizuje rozdělení napětí v okolí vrcholu trhliny pomocí dvou parametrů, tj. součinitele intenzity napětí K a T -napětí. Z praktických důvodů je výhodnější používat pro charakteristiku lomových parametrů bezrozměrné parametry. Pro součinitel intenzity napětí:

$$B_1 = \frac{K_I}{K_0}, \quad (2)$$

kde $K_0 = \sigma\sqrt{\pi a}$ (součinitel intenzity napětí pro Griffithův problém) kde a je délka trhliny.

Pro T -napětí zavedli Leever s Radonem v roce 1983 [19] pak bezrozměrný parametr

$$B_2 = \frac{T\sqrt{\pi a}}{K_I}. \quad (3)$$

V literatuře [11],[A12],[A16] existuje dvouparametrový popis pro pole napětí zahrnující i tloušťku tělesa t . Druhý člen Williamsova rozvoje při tenzorovém zápisu má pak následující tvar

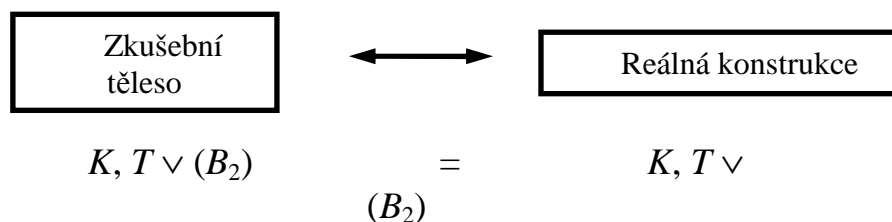
$$t_{ij}(z;t) = \begin{pmatrix} T(z;t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E\varepsilon_{zz}(z;t) + \nu T(z;t) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

kde E je Youngův modul a ε_{zz} je deformace ve směru osy z .

Poznamenejme, že při aplikaci dvouparametrového popisu pro cementové kompozity je poměr tloušťky zkušebních těles či reálných konstrukcí k charakteristickému rozměru nevýznamný, a tedy v práci se dále popisem nezabýváme.

2.2 METODIKA DVOUPARAMETROVÉ LOMOVÉ MECHANIKY

Metodika dvouparametrové lomové mechaniky je založena na předpokladu, podle kterého je lomové chování dvou těles identické, lze-li trhlínu v obou případech charakterizovat stejnou hodnotou součinitele intenzity napětí K a navíc i stejnou hodnotou parametru popisujícího constraint, tj. T -napětí (případně bezrozměrného parametru biaxiality B)



3 CÍLE

Dvouparametrový přístup rozšiřuje oblast použitelnosti klasické lomové mechaniky. Skutečnost, že v rámci tohoto přístupu lze popsat a případně do značné míry eliminovat vliv geometrie zkušebního tělesa na měřené kritické hodnoty lomově-mechanických parametrů materiálu, má pro inženýrské i výzkumné aplikace klíčový význam. Toto lze jednoznačně dokumentovat výsledky z oblasti porušení zejména křehkým lomem [5],[16]. Vysvětlení závislosti hodnot lomové houževnatosti na geometrii tělesa pomocí T -napětí umožňuje dokonalejší a spolehlivější využití určených lomově-mechanických vlastností materiálu a má zásadní význam především pro konstrukce vysoké společenské a ekonomické důležitosti pracující za extrémních provozních podmínek, např. transportní a úložné kontejnery pro vyhořelé jaderné palivo, zařízení používané u vrtných plošin pro těžbu ropy z mořského dna atp. Spolehlivý přenos lomově-mechanických dat z laboratorních měření na reálné konstrukce je pak klíčovým aspektem pro odhad jejich životnosti. Z hlediska fenomenologického popisu lze šíření trhlin rozdělit na iniciační stadium, stadium šíření krátkých trhlin a oblast šíření dlouhých trhlin.

Těžištěm snažení a současně hlavním cílem habilitační práce je aplikace dvouparametrové lineární elastické lomové mechaniky za účelem spolehlivějšího/přesnějšího přenosu experimentálně zjištěných dat na reálné konstrukce.

Přitom navážeme na již získané zkušenosti z experimentálních a numerických poznatků, které se týkají především vlivu constraintu na chování dlouhých únavových trhlin [15] a vlivu constraintu u krátkých trhlin v blízkosti bi-materiálového rozhraní [27] (autorova disertační práce).

Cíle práce jsou v korelaci s jednotlivými analyzovanými experimentálními konfiguracemi, pro zjišťování lomově mechanických parametrů u kompozitů, v kapitole 4 a jsou shrnuty v následujících bodech.

Zkušební těleso pro třibodový ohyb

Dvouparametrová analýza, vliv stísnění při různé geometrii tělesa, která je vyjádřena poměrem charakteristického rozměru W a vzdáleností podpor S . Analýza vlivu šířky, délky, tvaru iniciačního zářezu v 3PB tělese za použití zobecněné lomové mechaniky singulárních koncentrátorů napětí.

Zkušební těleso pro štípací test (wedge splitting test – WST)

Dvouparametrová analýza, vliv stísnění při různých okrajových podmínkách, vliv vlastní hmotnosti tělesa, uvažování vertikální složky zatížení, zjednodušení přípravy zkušebního tělesa pomocí mramorových příložek, poměrem charakteristického rozměru W a délky zkušebního tělesa S .

Modifikované zkušební těleso pro namáhání excentrický tahem (compact tension test – CT)

Dvouparametrová analýza tělesa vhodného pro zjištění únavového chování kompozitů při rostoucí trhlíně, vliv stísnění při různých okrajových podmínkách

Zkušební těleso pro kombinované zatěžování klínovým štípáním a tříbodovým ohybem

Dvoupřímá analýza, vliv stísnění u připravovaného testu pro získání lomové mechanických charakteristik kompozitů jako je např. lomová procesní zóna (LPZ) při nízké hladině stísnění (constraint effect).

Dílní výsledky z tohoto odvětví, v kterém autor dlouhodobě působí, byly průběžně publikovány v pracích autora a kolektivu spolupracovníků – odkazy na příslušné publikace, u nichž je autor práce členem autorského kolektivu, jsou v textu označeny [A a číslo práce]. Společně s dalšími odkazovanými zdroji jsou obsaženy v přehledu použité literatury v závěru práce.

4 VYBRANÉ METODY ZKOUŠENÍ V LOMOVÉ MECHANICE CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

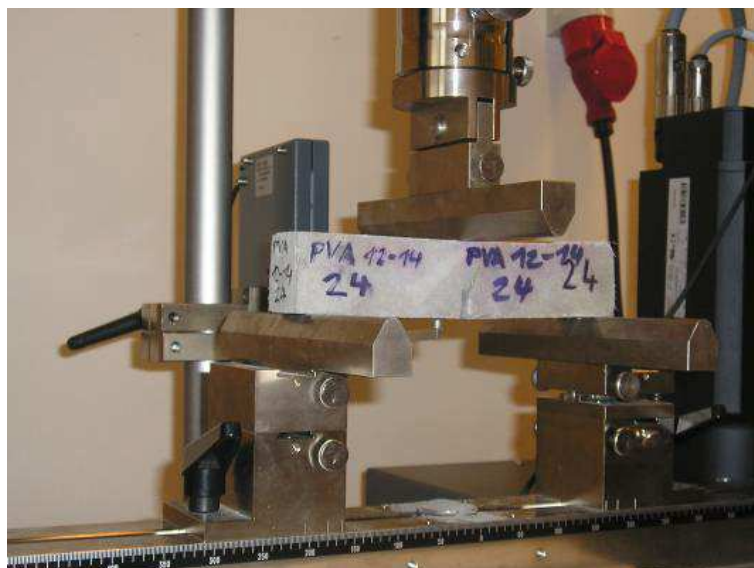
V posledních letech bylo představeno mnoho metod pro určování lomových parametrů cementových kompozitů. Všechny lomové parametry mohou být určeny tahovou zkouškou (tension test). S ohledem na potíže doprovázející tuto zkoušku však není pro cementové kompozity (bez vláken) považována za standardní [24]. V současné době pro zjišťování lomové mechanických parametrů jsou používány zkušební geometriemi: Brazilský disk např. [4], Arcan (nebo Arcan-Richard) zkušební těleso např. [9],[5], tříbodový ohyb na polokruhovém tělese [18], excentrický tah [29],[14] a jeho modifikace pro kvazikřehké materiály [23].

Ze stručného přehledu používaných geometrií plyne, že se jedná o poměrně širokou škálu zkušebních geometrií. V předkládané práci jsou geometrie zkušebních těles pro analýzu zvoleny tak, aby pokryly spektrum běžně užívaných experimentálních testů na FAST VUT v Brně a kooperujících zahraničních pracovištích (TU Vienna, Univerzita v Oviadu, Univerzita v Malaze, TU Kozalin, Univerzita v Gentu atd.) pro stavební materiály.

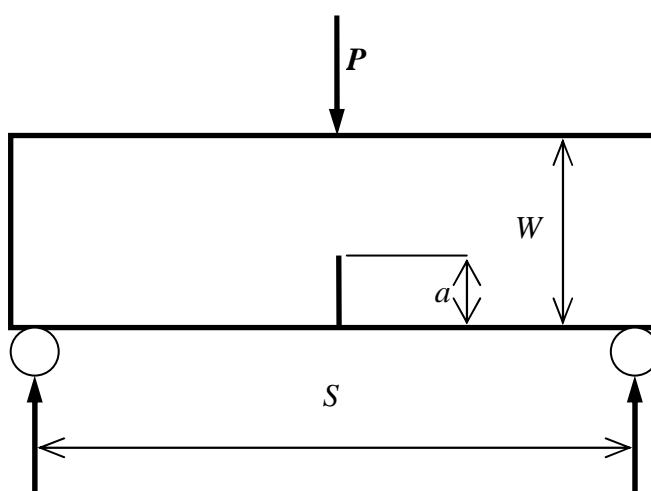
Nejtradičnějším a nejčastěji používaným testem je tříbodový ohyb trámce se zářezem, doporučovaný organizací RILEM [26]. V praxi je pak často, kvůli svým výhodám v porovnání s tříbodovým ohybem, používán test klínovým štípáním (Wedge splitting test – dále WST). Pro test únavovým zatěžováním lze snadnou úpravou vyrobit těleso z jádrových vývrtů, což bylo provedeno ve spolupráci s univerzitou v Oviadu, jedná se o modifikovanou variantu namáhání excentrickým tahem. A poslední je uvedena dvoupřímá analýza pro těleso kombinovaně namáhané tříbodovým ohybem a klínovým štípáním.

4.1 ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝ OHYBEM A JEJÍ GEOMETRICKÉ OBMĚNY

Podle doporučení RILEM [26] mohou být lomové parametry cementových kompozitů zjišťovány z tříbodového ohybu trámce se zářezem (Three point bending of notched beam), viz Obr. 2. Existuje mnoho doporučení ohledně tohoto experimentu, včetně analýz pro získání výsledků. Např. skupina kolem Prof. Bažanta v poslední době tento test použila pro prokázání zobecněného modelu vlivu velikosti [10].



Obr. 1. Konfigurace zkoušky tříbodově ohýbaného trámce se zářezem



Obr. 2. Tříbodový ohyb trámce se zářezem

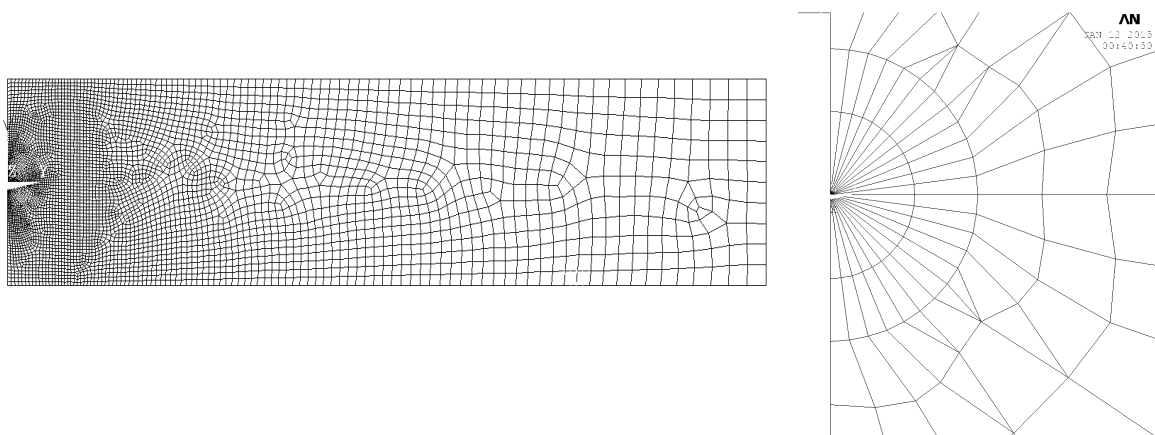
4.1.1 Vliv poměru charakteristické velikosti a délky zkušební tělesa

Těleso pro tříbodový ohyb z pravidla má jasně daný poměr mezi charakteristickým rozměrem tělesa, tj. jeho výškou W , a vzdáleností mezi podporami S , viz Obr. 2. V literatuře se vyskytuje několik různých poměrů, nejčastější poměr $S/W = 4$, viz [29], dalším poměrem, který je uveden např. v [14] je $S/W = 8$. V rámci experimentálního programu na FAST VUT v Brně se používají rozměry $W = 40$ mm a vzdálenost mezi podporami $S = 120$ mm, tedy $S/W = 120/40 = 3$, dalším typickým rozměrem je $W = 80$ mm a $S = 400$ mm, tedy $S/W = 400/80 = 5$, ve speciálních případech jsou pak používána tělesa $80 \times 80 \times 240$ (200) mm³, tedy $W = t = 80$ mm a $S = 200$ mm, $S/W = 200/80 = 2,5$.

Numerický model a vstupní materiálové parametry

Pro numerickou analýzu byl zvolen materiál s následujícími vlastnostmi $E = 30$ GPa a $\nu = 0,2$. Vstupní rozměrový parametr pro výpočet byl $W = 50$ mm. Poměr S/W pak byl; 3; 4; 5; 8. Tučně

vyznačené hodnoty sloužily ke kalibraci výpočtového modelu, a tedy numericky vypočtené hodnoty byly porovnány s literaturou [14]. Typický model s okrajovými podmínkami je pak uveden na Obr. 3. Vlastní hmotnost tělesa nebyla uvažována.

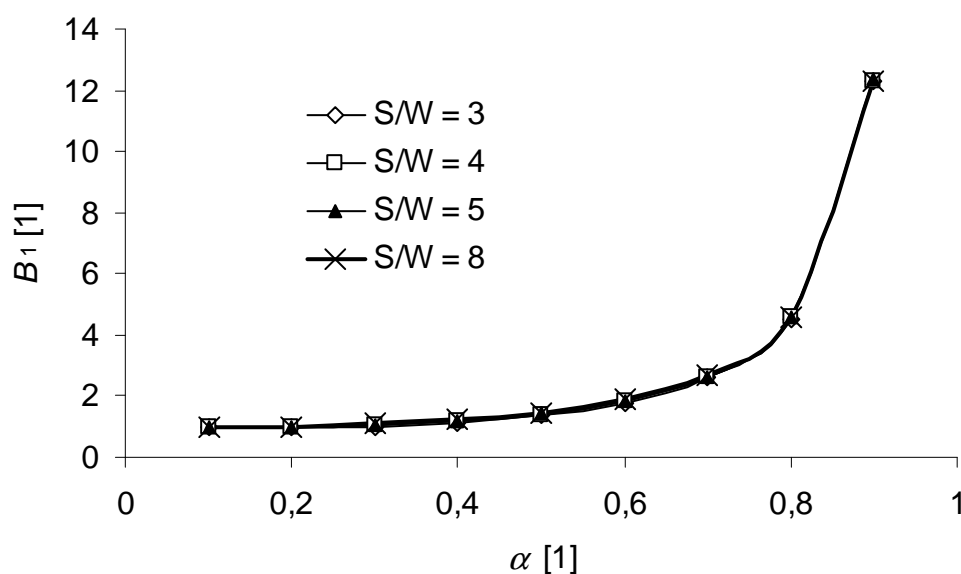


Obr. 3. Numerický model třebodové zkoušky s vyznačením symetrických okrajových podmínek a detail v blízkosti vrcholu trhliny s posunutím středového uzlu do $\frac{1}{4}$ délky strany trojúhelníkového elementu.

Dosažené výsledky

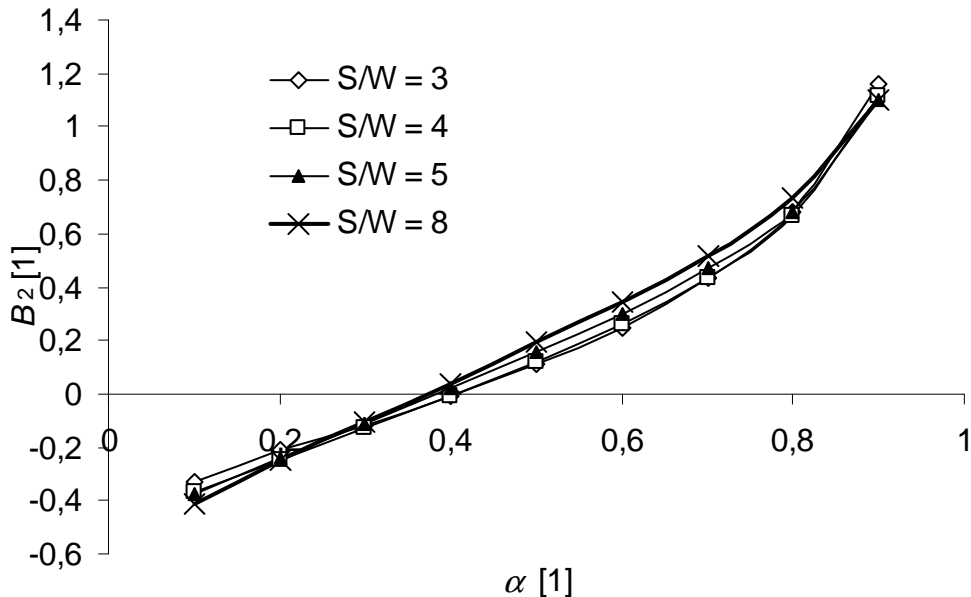
Porovnání normalizovaných hodnot pro součinitel intenzity napětí (tzn. B_1) a T -napětí (tzn. B_2) v závislosti na relativní délce zářezu α pro jednotlivé poměry S/W (vzdálenosti podpor S a charakteristického rozměru W) jsou uvedeny na Obr. 4 a 0.

Hodnoty funkce $B_1(\alpha)$ (normalizovaného součinitele intenzity napětí) jsou pro všechny sledované poměry S/W podobné viz Obr. 4.



Obr. 4. Průběh funkce $B_1(\alpha)$, tj. normalizovaného součinitele intenzity napětí pro vybrané poměry S/W (vzdálenosti podpor S a charakteristického rozměru W).

Výraznější rozdíl je však pro druhý člen T -napětí což je demonstrováno na 0, kde je vidět že mění průběh z negativní hodnoty do pozitivní od relativní délky trhliny $\alpha = 0,4$. Na počátku v intervalu pro relativní délku zářezu $\alpha \in (0,1; 0,3)$ je vliv geometrie pro $S/W = 8$ nejvýraznější, kdy má tento poměr nejmenší hodnotu B_2 . V okolí relativní délky trhliny 0,3 se křivky protínají a jejich trend se následně mění a tedy poměr $S/W = 3$ má pak nejmenší hodnotu T -napětí.

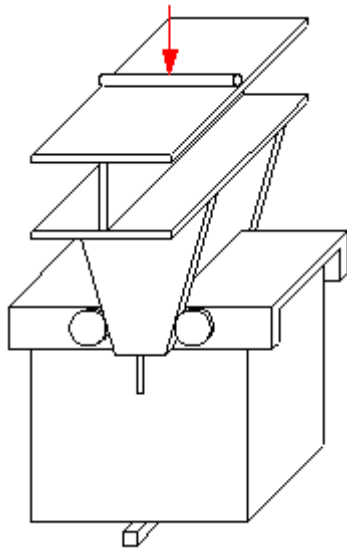


Průběh funkce $B_2(\alpha)$, tj. normalizovaného součinitele intenzity napětí pro vybrané poměry S/W (vzdálenosti podpor S a charakteristického rozměru W).

4.2 ZKOUŠKA KLÍNOVÝM ŠTÍPÁNÍM A JEJÍ MODIFIKACE

V následujících podkapitolách jsou v rámci dvouparametrové lomové mechaniky podrobně analyzovány možné konfigurace zkoušky klínovým štípaním. Zkouška používající k šíření trhliny rozevírání vzorku pomocí klínu (anglicky wedge splitting test – WST, viz Obr. 5) byl představen v práci autorů Linsbauer a Tschegg [20] a dále je ve své práci z roku 1990 rozvinuli Brühwiler a Wittmann [6]. Autory Guinea a kol. [7] byla následně prezentována parametrická studie vlivu okrajových podmínek na hodnotu součinitele intenzity napětí pro WST. Karihaloo a Xiao v práci [13] provedli za použití hybridního elementu výpočet nejenom součinitele intenzity napětí, ale i vyšších členů Willimasova rozvoje [32]. Přes již rozsáhlé použití WST (Shah a kol. [28], Xiao a kol [33], Löfgren a kol. [21], Xu a kol. [34]) doposud nebyly provedeny některé podrobné analýzy vlivu okrajových podmínek.

Zdůrazněme, že se jedná o test se stabilním růstem trhliny a jeho nespornou výhodou je použití relativně malého množství materiálu na rozdíl od standardně užívaných testů jako jsou např. tříbodový nebo čtyřbodový ohyb trámce se zářezem (RILEM)[25]. Je to poměrně nedávno zavedená procedura pro měření základních lomově mechanických parametrů jako jsou např. lomová energie nebo charakteristiky tahového změkčení kvazikřehkých materiálů. Zdůrazněme, že WST představuje test se stabilním růstem trhliny a jeho výhodou může být použití relativně malého množství materiálu na rozdíl od standardně užívaných testů, jako jsou např. tříbodový nebo čtyřbodový ohyb trámce se zářezem (RILEM) – při WST odpovídá velikost zkušebního tělesa přibližně centrální oblasti trámce zkoušených na tříbodový, příp. čtyřbodový ohyb. Nespornou výhodou je uplatnění WST při stanovování lomově-mechanických parametrů na jádrových vývrtech odebraných ze stávajících stavebních konstrukcí.



Obr. 5. Zkouška klínovým štípáním – axonometrické schéma (vlevo) a celkový pohled na experiment.

Pro vzájemnou závislost komponent kontaktní síly mezi klínem a ložiskem bez uvažování tření, tedy P_{sp} (splitting force – vodorovná síla) a P_v (vertical force – vertikální síla), viz Obr. 6, jsou vztahy následující

$$P = 2P_v \sin \alpha_w, \quad (5)$$

$$P_{sp} = P_v \cos \alpha_w, \quad (6)$$

$$P_{sp} = P / 2 \tan \alpha_w. \quad (7)$$

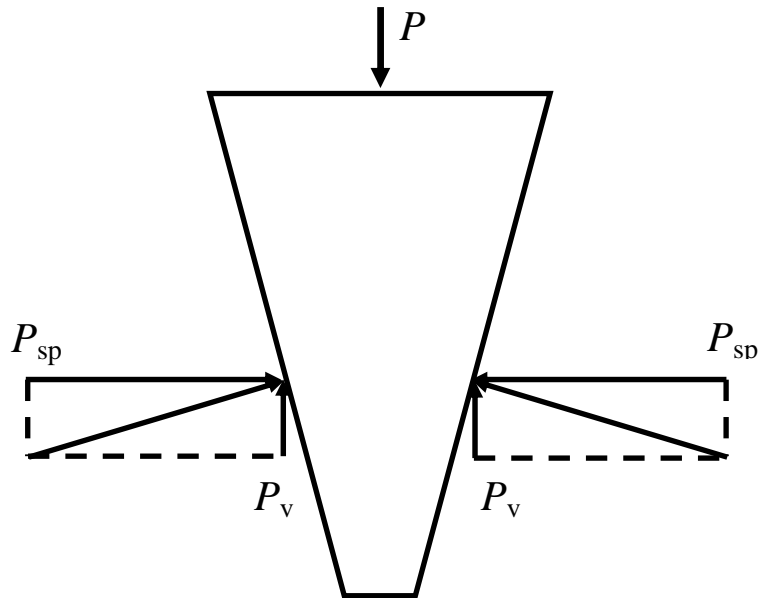
Pokud uvažujeme vliv tření v ložiscích na poměr mezi P_{sp} a P_v silami je vztah následující (byl uveden např. ve zprávě RILEM z roku 1991 [26]):

$$P_v = \frac{1}{2} P_{sp} k, \quad (8)$$

přičemž

$$k = \frac{2 \tan \alpha_w + \mu_c}{1 - \mu_c \tan \alpha_w}, \quad (9)$$

kde α_w je úhel rozevírajícího klínu a μ_c je koeficient tření v ložisku.

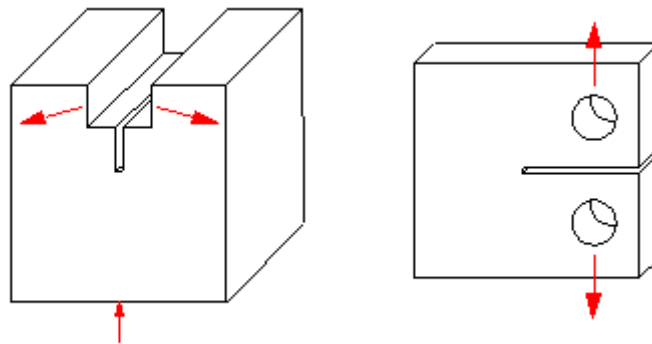


Obr. 6. Rozklad sil při zatížení klínem

4.2.1 Porovnání WST se standardizovanou zkouškou CT

Těleso pro zkoušku klínovým štípáním je v prvním kroku podrobena dvouparametrové analýze a porovnává se s výsledky pro geometricky podobné těleso pro namáhání excentrickým tahem, tzv. CT (Compact Tension specimen) [14], které je standardizované pro zkoušky na kovových materiálech. Těleso pro excentrický tah bylo vybráno pro jeho tvarovou podobnost s WST geometrií (pro oba typy zkoušek jsou porovnávána tělesa ve tvaru krychle a válce).

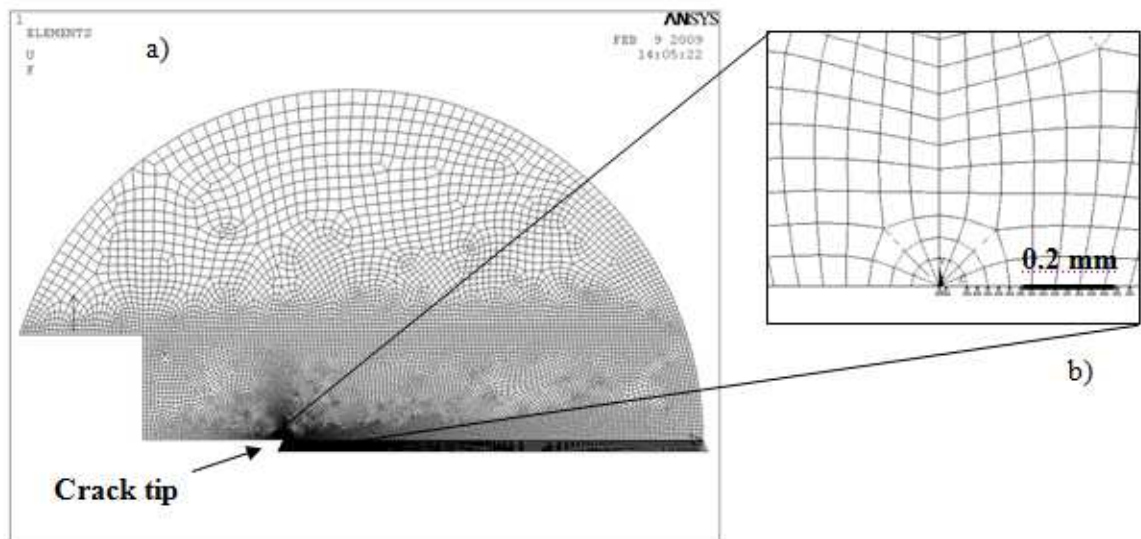
Úvodní studie se zaměřuje na základní geometrii tělesa, která byla publikována v článku Guinea a kol. [7], Karihaloo a Xiao [13] a jeho srovnání s CT tělesem, proto volíme základní zatížení pomocí síly rozevírající zářez a zanedbáváme tedy svislou komponentu zatížení.



Obr. 7. Zkouška klínovým štípáním (WST): zkušební těleso a místa působících sil; těleso pro zkoušku excentrickým tahem (CT).

Numerický model a vstupní materiálové parametry

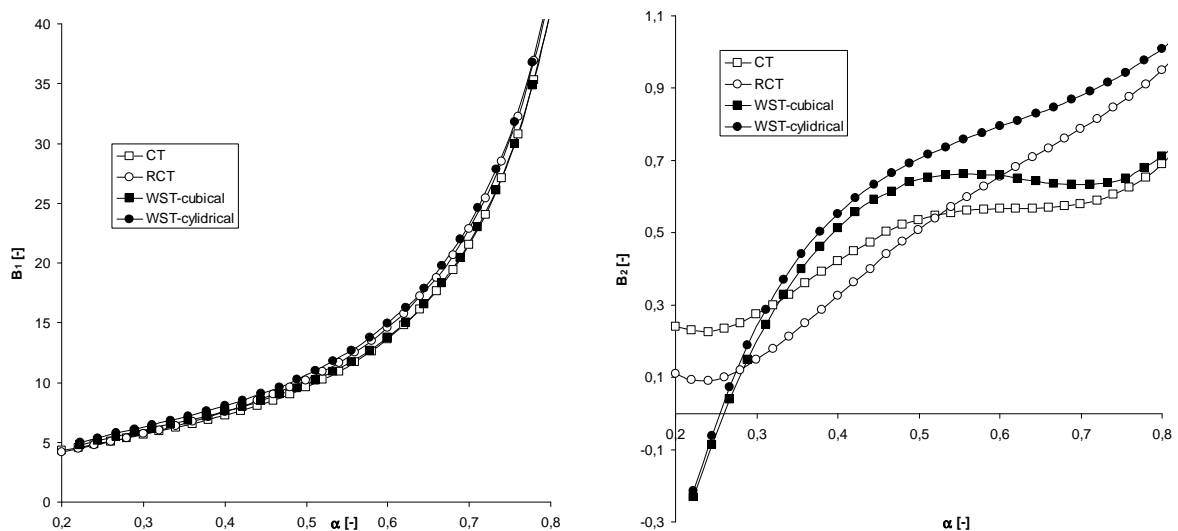
Základní rozměr tělesa pro klínové štípání a pro zkoušku excentrickým tahem je $W = 100 \text{ mm}$ – což je pak charakteristický rozměr použitý pro numerickou analýzu. Materiálové charakteristiky použité pro numerické výpočty pak jsou $E = 30 \text{ GPa}$ a $\nu = 0,2$. Okrajové podmínky a typická použitá síť v software ANSYS jsou pak uvedeny na Obr. 8.



Obr. 8. a) Typický MKP model pro kruhové těleso použitý při využití symetrie (modeluje se tedy polovina vzorku) včetně okrajových podmínek, b) detail v okolí kořene trhliny s posunutím uzlu do $\frac{1}{4}$ vzdálenosti prvku.

Dosažené výsledky

Porovnání normalizovaných hodnot pro součinitel intenzity napětí (tzn. B_1) a T -napětí (tzn. B_2) v závislosti na relativní délce zářezu α pro WST a CT těleso je uvedeno na Obr. 9. Hodnoty pro CT těleso jsou převzaty z literatury, např. [14]. CT těleso vykazuje jistou podobnost s WST tělesem, což je vidět na hodnotách pro B_1 zejména v intervalu 0,3 až 0,7, kde se pro nejbližší okolí kořene trhliny předpokládá nejmenší závislost napjatosti na způsobu zatěžování.



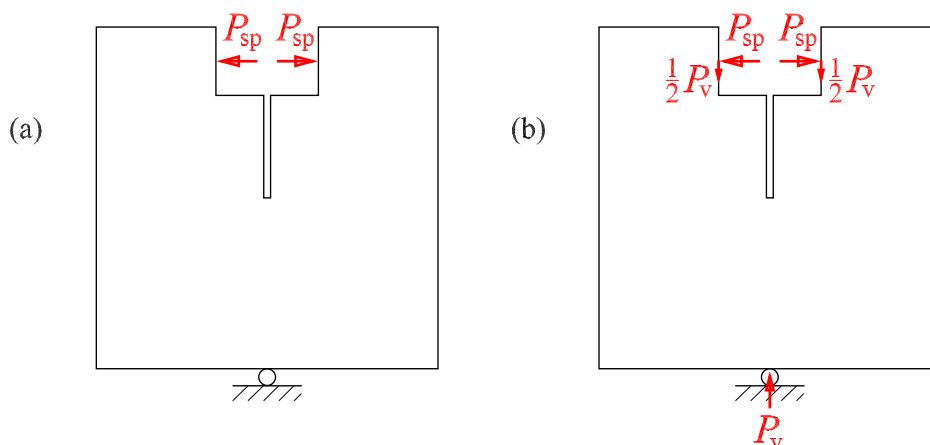
Obr. 9. Závislost součinitele intenzity napětí (vyjádřeného pomocí B_1) a závislost T -napětí (vyjádřeného pomocí B_2) na relativní délce trhliny α pro CT, RCT, WST-cubical a WST-cylindrical (publikováno v [A7]).

Na základě numerických výsledků pro normalizované hodnoty T -napětí, lze vidět, že funkce $B_2(\alpha)$ pro WST těleso začíná v záporných hodnotách a přechází do kladných, na rozdíl od CT

tělesa, pro nějž má $B_2(\alpha)$ vždy kladnou hodnotu. Pro dlouhé trhliny $\alpha > 0,7$ mají pak křivky podobný trend.

4.2.2 Vliv okrajových podmínek – uvážení vertikální síly

V následující analýze je kvantifikován vliv vertikální síly na průběh kalibračních křivek. Na rozdíl od prvního případu, kdy jsme porovnávali WST těleso s CT tělesem, nyní bereme do úvahy i vertikální složku síly označenou jako P_v . WST těleso s kompresní složkou síly, uvedené na Obr. 10b, lze jednoduše porovnat s Obr. 10a. Horizontální a vertikální složka síly mají přes úhel klínu definovanou vzájemnou závislost, viz rov. (8) a (9), což lze najít v literatuře, např. [12],[21]. Součástí rovnice je i zahrnutí vlivu tření; koeficient tření pro použité materiály se pohybuje v intervalu $\mu_c \in (0,0001; 0,005)$. V uvedené studii jsou vzaty v úvahu limitní stavy: $\mu_c = 0$, tj. stav bez tření, a $\mu_c = 0,005$ pro maximální tření.



Obr. 10. Zkouška klínovým štípáním: porovnání vlivu uvažování různých okrajových podmínek v oblasti roznášení zatížení (převzato z [A15])

Numerický model a vstupní materiálové parametry

Základní rozměr tělesa pro klínové štípání $W = 150$ mm, na Obr. 10 jsou uvedeny pak uvedeny rozdílné okrajové podmínky. Materiálové charakteristiky použité pro numerické výpočty pak jsou $E = 30$ GPa a $\nu = 0,2$.

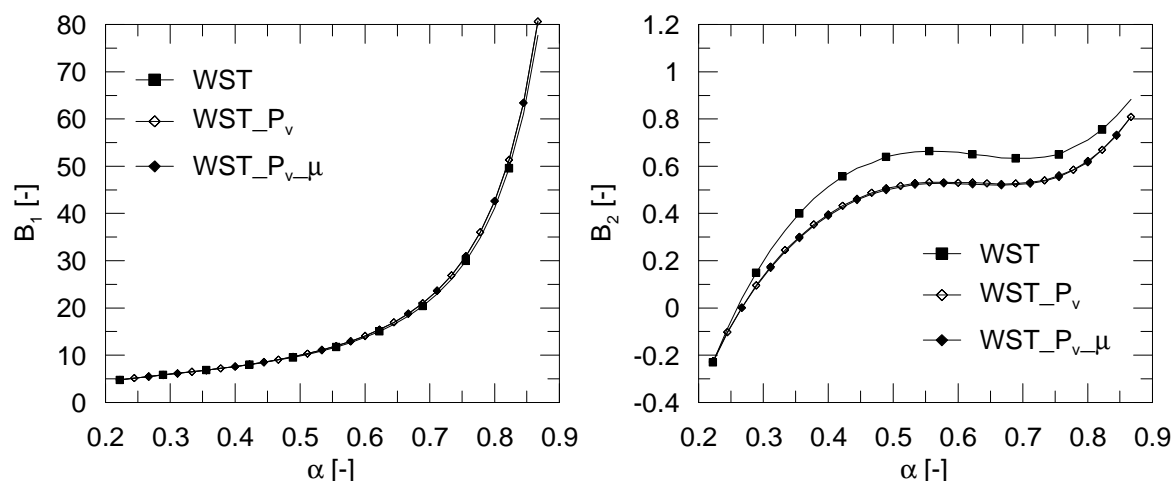
Dosažené výsledky

Porovnání normalizovaných hodnot pro součinitel intenzity napětí (tzn. B_1) a T -napětí (tzn. B_2) v závislosti na relativní délce zářezu α pro WST – zatíženo pouze vodorovnou rozevírající složkou síly, WST_Pv – zatíženo vodorovnou rozevírající složkou síly a vertikální složkou síly bez uvažování tření tedy $\mu_c = 0$, WST_Pv_μ – zatíženo vodorovnou rozevírající složkou síly a vertikální složkou síly s uvažování tření tedy $\mu_c = 0,005$, je uvedeno na Obr. 11.

Kalibrační křivky pro součinitel intenzity napětí $B_1(\alpha)$ mají pro všechny tři studované případy stejný trend. Menší rozdíly lze pozorovat od relativní délky zářezu $\alpha > 0,7$, kde začíná hrát roli efekt podpory (tlakové reakce). Vliv tření, tedy rozdíl mezi křivkami WST_Pv a WST_Pv_μ je prakticky zanedbatelný.

Funkce normalizovaných hodnot pro T -napětí, $B_2(\alpha)$, jsou uvedeny na Obr. 11. Vliv přítláčné síly je podstatný v intervalu 0,3 až 0,7 což plyne ze srovnání křivek WST a WST_Pv, zatímco vliv tření je zanedbatelný. Pokud budeme vliv tření kvantifikovat, tak při jeho neuvažování bychom se

při vyhodnocování lomových testů dopouštěli chyby maximálně do 2% a lze je tedy při dalších numerických výpočtech zanedbat.



Obr. 11. Závislost součinitele intenzity napětí (vyjádřeného pomocí B_1) a závislost T-napětí (vyjádřeného pomocí B_2) na relativní délce trhliny α pro WST, WST s vertikální složkou síly a WST s vertikální složkou síly zahrnující tření.

4.3 ZKOUŠKA EXCENTRICKÝM TAHEM A JEJÍ MODIFIKACE PRO CEMENTOVÉ KOMPOZITY

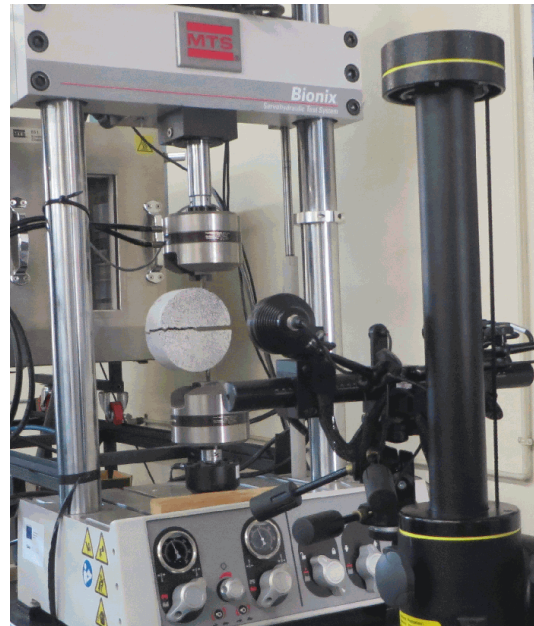
V literatuře lze najít několik modifikací pro zkoušku excentrickým tahem (anglicky *Compact Tension specimen* – CT) pro kvazikřehké materiály [23],[A17], některé její aplikace jsou zaměřené na dynamickou zkoušku trhnutím nebo pro měření růstu trhliny v kompozitech. Myšlenka aplikace uvedeného CT testu není nová, např. Wagner a kol. [31] představili tento druh testu na asfaltových betonech, ale měli více než 50% poškození tělesa mimo iniciační koncentrátor napětí.

V této podkapitole se práce zaměřuje na numerickou podporu modifikované zkoušky excentrickým tahem (anglicky *Modified Compact Tension test* – MCT), přičemž modifikace spočívá v uchycení betonového vzorku přes ocelové tyče do čelistí únavového stroje MTS, viz Obr. 12. Jsou uvedeny základní numerické výsledky zachycující vliv okrajových podmínek na lomově mechanické parametry. První část je věnována srovnání se standardizovanou zkouškou excentrickým tahem uvedené v ASTM [3] a v druhé části pak je zachycen vliv jisté nepřesnosti umístění ocelových tyčí na vyhodnocovací kalibrační křivky. Vyhodnocení růstu trhliny při dynamickém zatížení pak provádí spolupracující pracoviště na Univerzitě v Oviudu přes optické zařízení ARAMIS, viz Obr. 12 vpravo.

4.3.1 Porovnání výsledků MCT s CT

Porovnání výsledků pro modulované a standardní zkoušky excentrickým tahem (MCT versus CT) je předmětem následujících kapitol. Na Obr. 13 je uvedeno těleso pro excentrický tah (CT), které je normované v ASTM [3] a běžně se používá pro vyhodnocení rychlosti šíření únavové trhliny pro kovové materiály – u daného tělesa jsou kalibrační křivky obecně známy pro první člen např. [22],[29] a pro oba členy Williamsovy řady, viz [15].

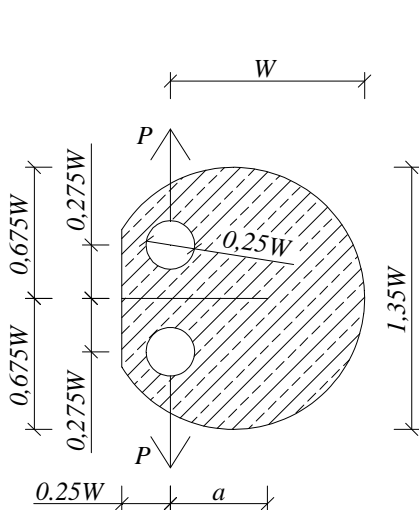
Charakteristický rozměr tělesa W a průměr tělesa D pro CT tělesa jsou v poměru $D/W=1,35$.



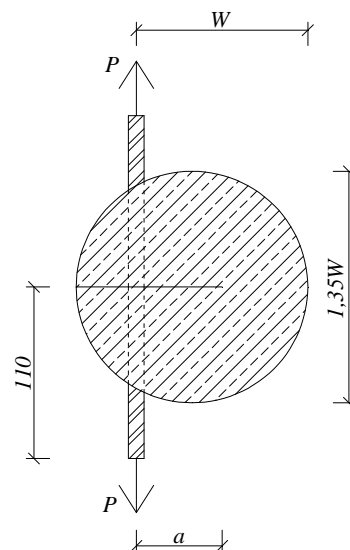
Obr. 12. Zkušební těleso MCT – měřící zařízení: únavový stroj MTS Bionix a optické monitorování deformace pomocí ARAMIS

Numerický model a vstupní materiálové parametry

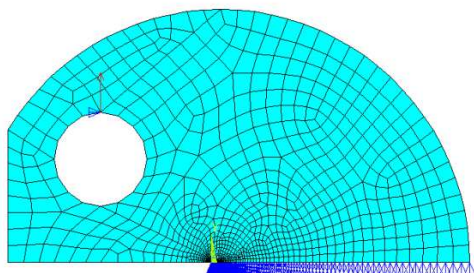
Materiálové charakteristiky kompozitu použité pro numerické výpočty pak byly $E = 30$ GPa a $\nu = 0,2$ a ocelový tyčí $E = 210$ GPa a $\nu = 0,3$. Z důvodu reálné šířky tělesa $t = 60$ mm byly úlohy modelovány za podmínek rovinné deformace. Rozhraní mezi ocelovou tyčí a cementovým kompozitem pak bylo uvažováno s dokonalou adhezí. V prvním kroku byl sestaven numerický model v software ANSYS pro CT těleso viz Obr. 15, na tělese bylo provedeno několik výpočtů pro zjištění, s jakou mírou přesnosti model počítá a případně se ladila MKP síť tak, abychom dostali srovnatelné výsledky s literaturou. Ve druhém kroku byly pak do tělesa umístěny ocelové tyče při zachování stejné polohy pro působíště sil, viz Obr. 16.



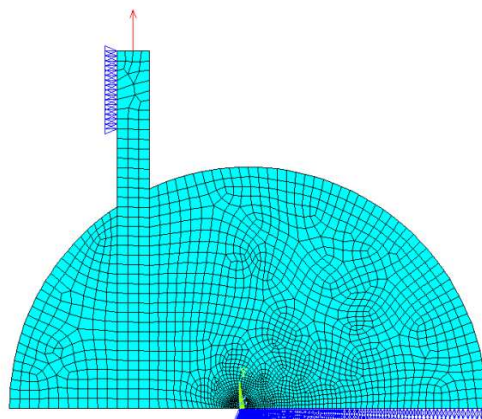
Obr. 13. Zkušební těleso pro standardní zkoušku excentrickým tahem, převzato z [3]



Obr. 14. Zkušební těleso, modifikovaná CT zkouška



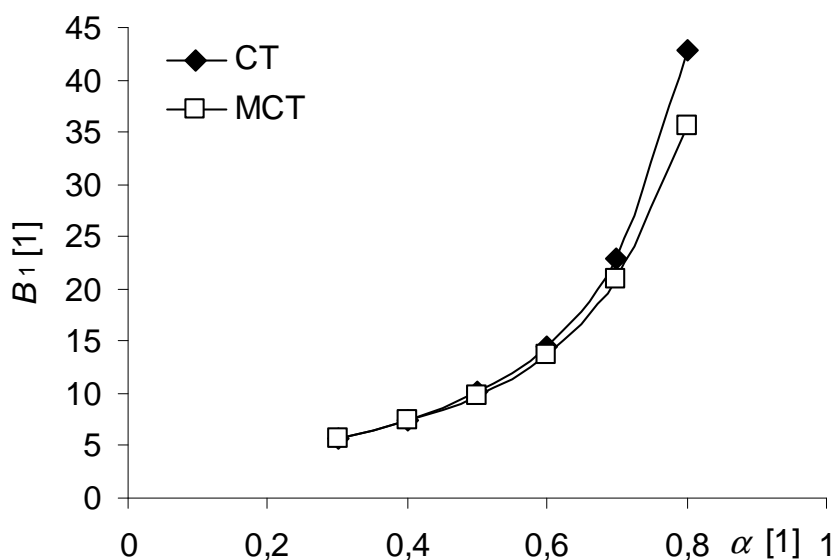
Obr. 15. MKP síť a okrajové podmínky pro standardní těleso pro excentrický tah – CT



Obr. 16. MKP síť a okrajové podmínky pro modifikované těleso pro excentrický tah –MCT

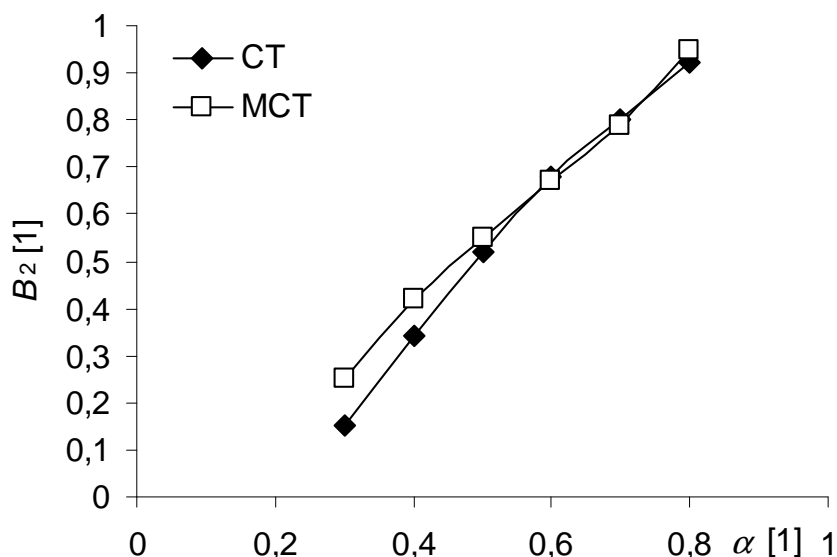
Dosažené výsledky

Získané výsledky pro součinitel intenzity napětí (tzn. B_1) a T -napětí (tzn. B_2) v závislosti na relativní délce zářezu α pro CT a MCT těleso jsou uvedeny na Obr. 17 a Obr. 18. V první části grafu do $\alpha < 0.5$ pro hodnotu B_1 jsou křivky pro obě tělesa podobné v druhé části grafu pro $\alpha > 0.5$ je pak vidět že CT těleso má vyšší hodnotu B_1 .

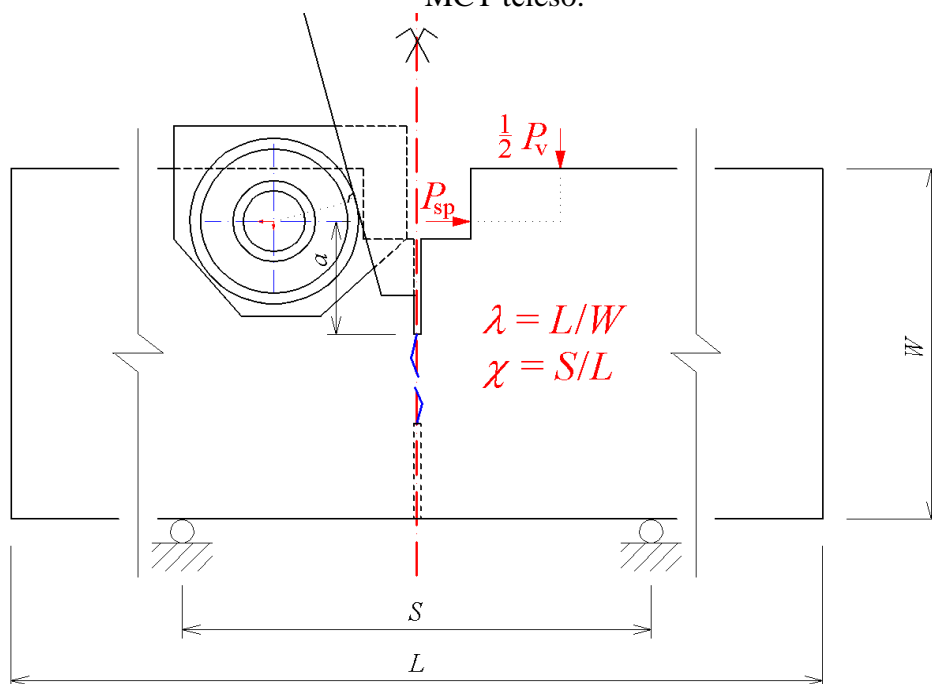


Obr. 17. Závislost součinitele intenzity napětí (vyjádřeného pomocí B_1) na relativní délce trhliny α pro CT a MCT těleso.

Změna hodnot bezrozměrného faktoru biaxiality B_2 je pak uvedena na Obr. 18. Trend obou křivek je podobný, v důsledku jiného uchycení tělesa je pak vidět pro krátké relativní délky trhlín, že hodnoty jsou rozdílné.



Obr. 18. Závislost T -napětí (vyjádřeného pomocí B_2) na relativní délce trhliny α pro CT a MCT těleso.



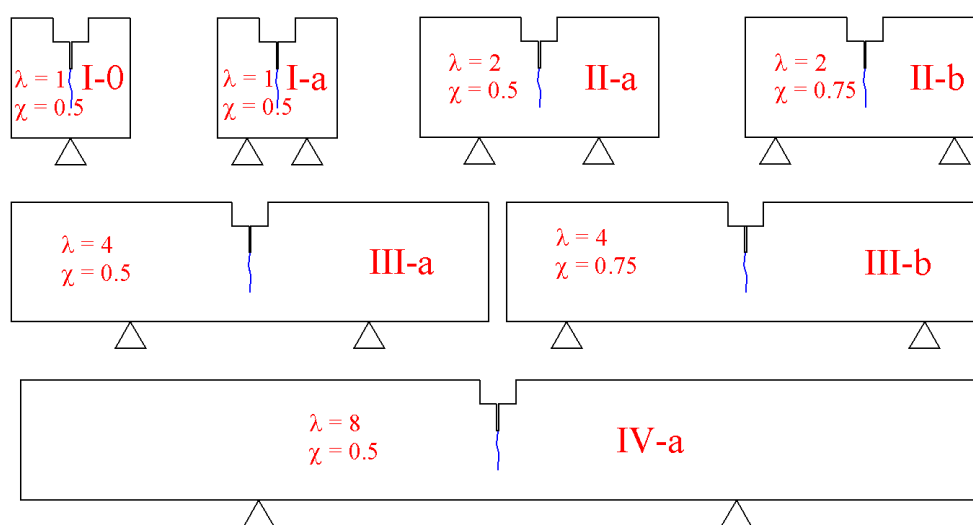
Obr. 19. Geometrie zkušební tělesa pro kombinovanou zkoušku klínovým štípáním a tříbodovým ohybem (převzato z [A22])

4.4 KOMBINOVANÁ ZKOUŠKA KLÍNÝM ŠTÍPÁNÍM A TŘÍBODOVÝM OHYBEM

Dle doporučení [26] se lze v praxi setkat zejména s tzv. *tříbodovým ohybem* (3PB). Avšak další zprávy a doporučení [24] uvažují i s konfigurací, označovanou jako *test štípáním klínem/štípací test* (WST) [30]. Oproti 3PB, kdy je iniciační zářez uprostřed rozpětí na taženém líci tělesa, které je namáháno ohybem, dochází u WST k rozevírání zkušební tělesa prostřednictvím ocelových příložek posouvajících se klínem (Obr. 19). Ohybové geometrie jsou charakteristické velkým stísněním zóny za čelem postupující trhliny (zejména pro delší trhliny), dochází tak ke stabilnímu šíření od místa iniciační trhliny až k místu vnášeného posunutí/síly. Nestabilní šíření je typické pro

tělesa namáhaná tahem (tedy nižší stísněnost za čelem trhliny). Avšak zkouška v takové konfiguraci je (pro cementové kompozity) velice náročná na své provedení.

Jako slibná se jeví kombinace 3PB (tvaru zkušebního tělesa a jeho podepření) a WST (způsobu zatížení), která by při různém nastavení několika parametrů simulovala odlišné stísněnosti [A18] za čelem trhliny, a tím pádem jiný rozsah lomové procesní zóny (LPZ) [A22]. Na Obr. 1 vlevo lze vidět schéma zkušební konfigurace takového atypického tělesa, včetně parametrů λ a χ , které jsou závislé na délce L , šířce W a rozpětí podpor S tělesa. Rozklad zatížení, které se přenáší vtláčováním klínu mezi čepy příložek, je vyjádřen dvěma komponentami sil – vodorovnou a svislou. Jejich hodnoty jsou různé pro různý úhel zkosení klínu. Obr. 20 shrnuje uvažované zkušební konfigurace o jednotné šířce $W = 100$ mm, včetně statického schématu podepření – čárkované podpory ukazují alternativní variantu. Písmeno a popř. b v označení varianty, následující za římskou číslicí, vyjadřuje délku, na které je realizováno podepření, resp. hodnotu parametru χ (pro variantu a nabývá χ hodnoty 0,5, u b je $\chi = 0,75$).

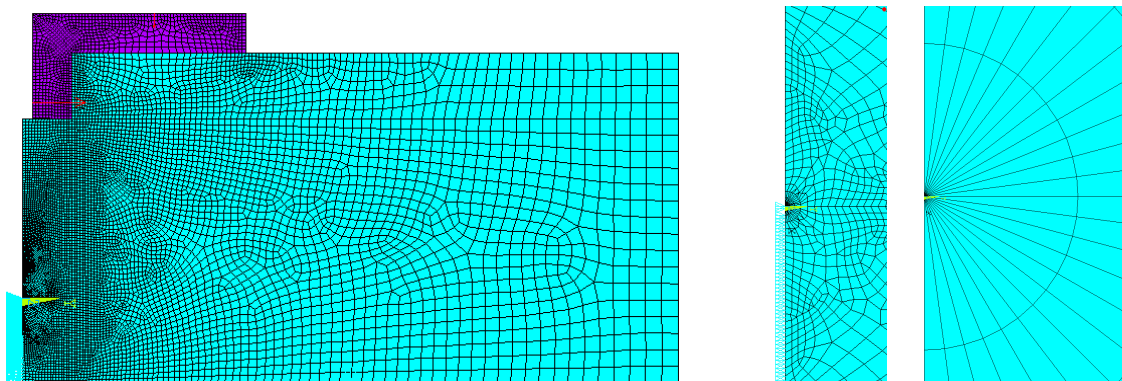


Obr. 20. Schématické zobrazení těles s vybranými poměry $\lambda = L/W$, $\chi = S/L$ použitých pro numerické simulace (převzato z [A18]).

Numerický model a vstupní materiálové parametry

Každá z variant, prezentovaných na Obr. 20, byla podrobena analýze v software ANSYS. Rovinné numerické modely za podmínek rovinné deformace (ukázka na Obr. 21) byly vytvořeny na základě uvedených geometrií vždy jako symetrické (tedy $\frac{1}{2}$ tělesa). U vrcholu trhliny byly použity trhlinové prvky a s posunutým uzlem do $\frac{1}{4}$ vzdálenosti, viz Obr. 21.

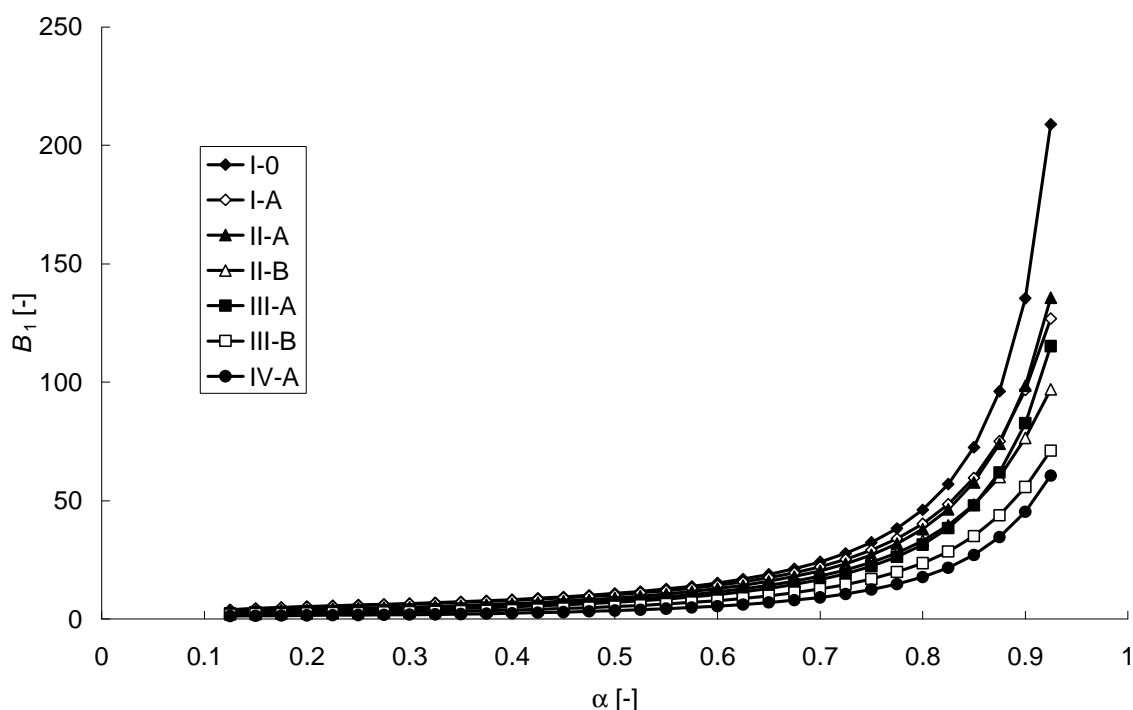
Byl použit materiálový model o následujících parametrech: Youngův modul pružnosti $E = 35$ GPa, Poissonův součinitel $\nu = 0,2$. Pro ocelové roznášecí příložky bylo využito elastického materiálu s $E = 210$ GPa a $\nu = 0,3$.



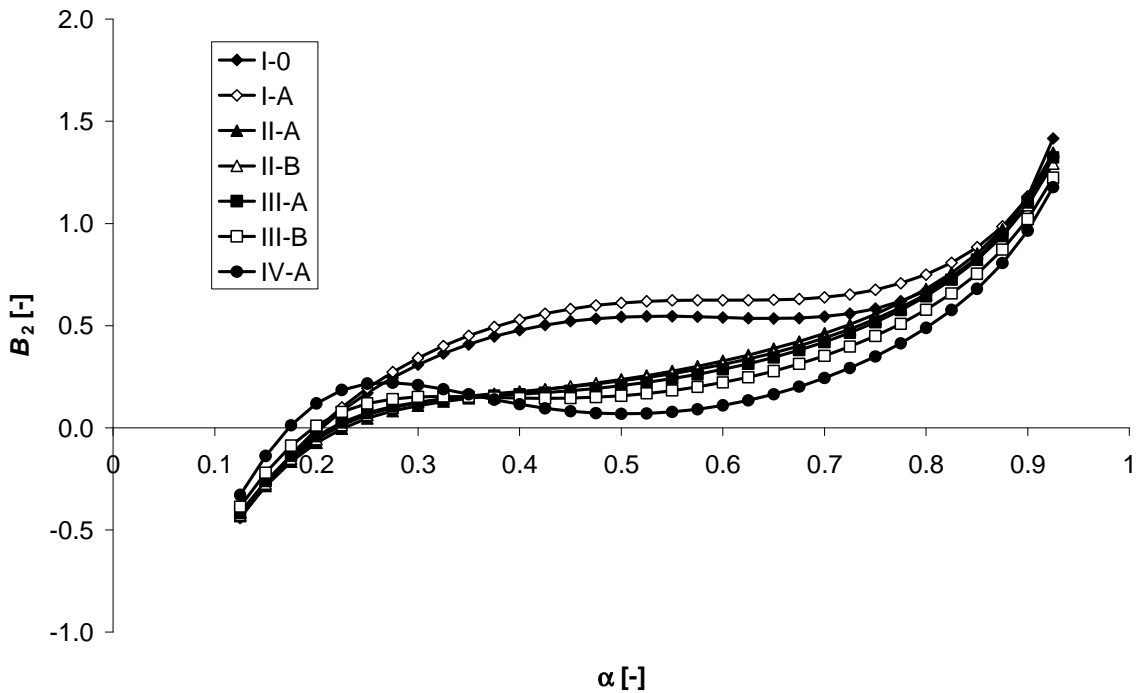
Obr. 21. Příklad výpočtového modelu s aplikovanými okrajovými podmínkami, přiblížení blízkosti kořene trhliny – rozložení elementů a pohled na použitý element s posutým uzlem do $\frac{1}{4}$ vzdálenosti (převzato z [A19]).

Dosažené výsledky

Získané výsledky pro součinitel intenzity napětí (tzn. B_1) a T -napětí (tzn. B_2) v závislosti na relativní délce zářezu α pro konfigurace definované na Obr. 20 (I-0, I-a, II-a, II-b, III-a, III-b a IV-a) jsou uvedeny na Obr. 22 a Obr. 23. Vliv ohybového momentu současně s rozevíráním trhliny je podle očekávání pro nízkou hodnotu relativní délky zářezu $\alpha \in (0,1; 0,5)$ nepatrný hlavní roli zde hraje otevírání trhliny klínem. Následně je vidět výrazný pokles hodnot B_1 při změně konfigurace od I ke IV, kdy dochází v důsledku průhybu k uzavírání trhliny.



Obr. 22. Závislost součinitele intenzity napětí (vyjádřeného pomocí B_1) na relativní délce trhliny α pro konfigurace definované na Obr. 20



Obr. 23. Závislost T -napětí (vyjádřeného pomocí B_2) na relativní délce trhliny α pro konfigurace definované na Obr. 20

5 ZÁVĚR

Při experimentálním určování kritických hodnot lomové mechanických parametrů stavebních materiálů vedou nepřesnosti v geometrii používaných zkušebních těles včetně iniciačních vrubů (spolu s heterogenitou cementových kompozitů) k velkému rozptylu výsledných hodnot. Zpřesnění metod jejich určování je tedy velmi důležité pro spolehlivou aplikaci nástrojů lomové mechaniky při charakterizaci materiálů a návrhu a posouzení konstrukcí.

Tříbodový ohyb

Získané výsledky na tělesech pro tříbodový ohyb ukazují, že zejména v počátečním stadiu zatěžování vzorků může být rozhodující geometrie iniciačního vrubu, především jeho šířka. Zkoušky tříbodovým ohybem byly simulovány v [A1],[A2],[A3] a [A5] metodou konečných prvků. Zářez vyráběný u těles před testem diamantovou pilou byl modelován jako obdélníkový vrub se dvěma vrcholy, přičemž ve shodě s experimentálními poznatky byl zaveden předpoklad šíření trhliny pouze v jednom z nich. Bylo vyšetřováno lomové chování těchto vzorků s ohledem na proměnnou šířku startovacího zářezu. Uvažovaný vrchol vrubu byl modelován jako obecný singulární koncentrátor napětí. Výsledkem byla závislost iniciačního zatížení potřebného pro vznik trhliny na šířce vrubu. Byl sledován také směr porušení v závislosti na šířce počátečního zářezu. Iniciační zatížení narůstalo se šířkou vrubu, přičemž k největším změnám docházelo v oblasti úzkých vrubů. Pro typické šířky vrubů (2 až 3,5 mm) byla závislost již nevýrazná – ukázalo se jako nepodložené doporučení např. v [12], aby šířka zářezu nepřekračovala 3 mm. Stejný charakter měla i závislost efektivní hodnoty součinitele intenzity napětí, ze které může plynout nadhodnocení (až o 50 %) určované efektivní lomové houževnatosti pro typicky používané šířky zářezů.

Na druhé straně výsledky ukázaly, že šíření takto iniciované trhliny ligamentem vzorku není, s výjimkou počátečního stadia, ovlivněno šířkou zářezu a trhlina se v konečné fázi šíří kolmo na zatěžovaný povrch. Bylo ukázáno, že korektní určení hodnoty efektivní lomové houževnatosti musí zohlednit nejenom vliv hloubky vrubu, ale i jeho šířku. V případě, že není taková korekce prováděna, dochází při vyhodnocování reálných lomových zkoušek k nadhodnocení určovaných hodnot efektivní lomové houževnatosti.

Analýza vlivu tvaru a šířky počátečního zářezu (koncentrátoru napětí) na chování zkušebního trámce při tříbodovém ohybu byla provedena numericky za předpokladu křehkého materiálu. Přístup založený na předpokladu ideálně křehkého chování materiálu ukazuje pozvolný nárůst hodnot kritické zatěžovací síly s rostoucí šířkou zářezu a podstatný nárůst kritické zatěžovací síly pro zářezy vyvolávající nižší koncentraci napětí/slabší singularitu napětí [A6].

Klínové štípání

Pro získání adekvátních numerických výsledků pro popis pole napětí byla provedena analýza vlivu změny geometrie tělesa na hodnoty lomově mechanických parametrů z geometricky podobného tělesa po excentrický tah. Studovány byly oba používané tvary, jeden, jenž je možno vyrobit ze zkušební krychle, t a druhý tvar, který je možno vyrobit z jádrového vývrtu. Geometrická podobnost je zejména vidět pro první člen B_1 , kdy jsou hodnoty podobné zejména pro dlouhé trhliny $\alpha \geq 0,5$. Průběh faktoru B_2 popisujícího geometrii je rozdílný, tedy změna okrajových podmínek je zachycena v hodnotě tohoto faktoru, pro krátké trhliny je hodnota vyjadřující úroveň stísnění pro WST tělesa záporná, zatímco pro CT tělesa je vždy kladná.

Práce [A6] [A8] pak vyšetřují vliv přítláčné síly či umístění podpory/podpor (příp. včetně tření v podporách) na hodnoty součinitele intenzity napětí a na hodnoty constraintu pro krychlový, příp. válcový, vzorek během WST (opět v závislosti na relativní délce trhliny).

Za použití metody konečných prvků je v [A9] analyzován vliv vlastní tíhy vzorku na hodnotu součinitele intenzity napětí a na hodnotu stísnění (charakterizovaného hodnotou T -napětí) v krychlovém vzorku pro WST. V práci je sledován průběh hodnot součinitele intenzity napětí a T -napětí v závislosti na relativní délce trhliny. Vliv vlastní tíhy vzorku na hodnotu součinitele intenzity napětí je zcela zanedbatelný. Při neuvážení vlastní tíhy vzorku dojde k podcenění úrovně stísnění o max. 4 procenta u materiálů s velkou objemovou hmotností (velmi těžké betony), u běžných betonů půjde o podcenění okolo 2 procent. Tedy lze vyslovit doporučení, že při stanovování lomově mechanických parametrů betonových kompozitů lze tíhovou sílu od vlastní hmotnosti vzorku na rozdíl od vertikální tlačné síly zanedbat.

Další analyzovanou okrajovou podmínkou je vzdálenost podpor při WST zkoušce. Vliv na hodnotu součinitele intenzity napětí B_1 je zanedbatelný a podle předpokladu pro vzdálenější podpory se bezrozměrná hodnota pro T -napětí (B_2) trendově přibližuje hodnotě bez uvažování podpory.

Vliv změny tuhosti zkoušeného tělesa při nahrazení horní části tělesa mramorovou destičkou pro umožnění zapření ocelových platů, je pak uvedeno v [A23] (pilotní studie pro pěno betony) a [A20] (komplexní analýza pro možné materiálové konfigurace při WST experimentu). Vliv je zanedbatelný a pro vyhodnocení lze použít K a T - kalibrační křivky pro homogenní materiál. Maximální chyba/odklon od standardní křivky je 1,5%.

Vliv délky tělesa je pak studován v [A20], kdy pole napětí před čelem trhliny pro základní rozměr krychelného tělesa je porovnáno s polem napětí pro tělesa větších délek při zachování charakteristického rozměru 200 a 300 mm). Rozměr nelze zanedbat a pro vyhodnocení je třeba uvažovat kalibrační křivky pro jednotlivé délky.

Konfigurace zkoušky štípáním klínem má i svá negativa. Do zkušební tělesa pro experimentální zkoušení se musí vyříznout drážka, do které se osazují ocelové zatěžovací příložky. V rozích této drážky tak vznikají dva silné koncentrátoři napětí a zkušební těleso pak může podléhat porušení vznikajícímu právě z těchto rohů, což zapříčiňuje jistou ztrátu (disipaci) energie potřebnou pro šíření trhliny z iniciačního zářezu. Problematice disipace energie z koutů drážky se věnují autoři Veselý a kol [A13] a Seitl a kol. [A14].

Podívejme se podrobněji na problematiku vlivu hloubky zářezu, křehkosti kompozitu a blízkosti druhého možného koncentrátoru napětí – rohu drážky – na průběh WST pro kvazikřehký krychlový vzorek ([A10], [A11] a [A13]). Tato studie navázala na předchozí, výše uvedené. Trhlina se může iniciovat ze dvou, resp. tří, hlavních existujících koncentrátorů – čela zářezu a rohu/rohů drážky – a dále z oblastí kontaktů vzorku a ocelových příložek, příp. oblasti v okolí podpory/podpor. O tom, ze kterého koncentrátoru se bude trhlina skutečně iniciovat, spolurozhodují faktory jako např. délka a tvar zářezu, resp. drážky. V případě křehkých materiálů dochází k iniciaci a následné propagaci trhliny pouze z jednoho koncentrátoru.

Modifikované těleso pro excentrický tah

Pro získání adekvátních numerických výsledků pro popis pole napětí byla provedena analýza vlivu změny geometrie tělesa na hodnoty lomově mechanických parametrů z geometricky podobného tělesa po excentrický tah. Studován byl pak používaný tvar, jež je možno vyrobit z jádrového vývrtu (kruhové těleso). Studie je provedena za účelem vyhodnocení životnosti staveb z cementových kompozitů, kdy se stává dominantní je (hraje důležitou roli) namáhání cyklické. Myšlenka aplikace uvedeného CT testu není nová, např. Wagner a kol. [31], představili tento druh testu na asfaltových betonech, ale měli více než 50% poškození tělesa mimo iniciační koncentrátor napětí. Při uvedené konfiguraci není třeba vyvrtat otvory pro čep, přes který je těleso zatěžováno, jako je tomu u klasického CT tělesa pro testování lomově mechanických parametrů kovových materiálů viz Obr. 13. Dosažené výsledky ukazují za nutnost připravit K a T -kalibrační křivky pro MCT tělesa i s uvažováním místa polohy pro zatěžující tyče.

Těleso pro kombinovaný test klínovým štípáním a třibodovým ohybem

V návaznosti na studium umístění podpor u tělesa pro klínové štípání byla provedena rozsáhlá numerická studie pole napětí před čelem trhliny pro zkušební tělesa, která jsou kombinací testu ohybového a zároveň štípacího [A19],[A21]. Studie zahrnuje různé varianty tvarů těles a okrajových podmínek pro docílení rozdílného stínění za čelem trhliny. Výsledky studie budou využity, s vyloučením méně vhodných variant, při navrhování a výrobě zkušebních těles pro reálný experiment pro testování předpokládaných hypotéz týkajících se nutnosti zahrnutí parametrů jako je např. lomová procesní zóna (LPZ) do procesu určování lomových charakteristik kvazikřehkých materiálů.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ANDERSON, T. L. Fracture Mechanics Fundamentals and Applications, Second Edition, 1995, CRC Press
- [2] ANSYS (<http://www.ansys.com/>)
- [3] ASTM E-647 Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates., 100 Barr Harbor drive, West Conshohocken, United States
- [4] ATKINSON C., SMELSER, R.E. SANCHEZ, J. Combined mode fracture via the cracked Brazilian disc test, *International Journal of Fracture*, 18 (1982), pp. 279–291
- [5] AYATOLLAHI, M.R., SEDIGHIANI, K., A T-stress controlled specimen for mixed mode fracture experiments on brittle materials, *European Journal of Mechanics A/Solids*, 36 (2012), pp. 83–93
- [6] BRÜHWILER, E., WITTMANN, F.H. The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics test, *Engineering Fracture Mechanics* 35 (1990), pp. 117–125
- [7] GUINEA, G.V, ELICES, M., PLANAS, J. Stress intensity factors for wedge-splitting geometry, *International Journal of Fracture* 81 (1996), pp. 113–124.
- [8] GUPTA M., ALDERLIESTENBA R.C., BENEDICTUS R. A review of *T*-stress and its effects in fracture mechanics, *Engineering fracture mechanics*, (2014) (on line) doi:10.1016/j.engfracmech.2014.10.013
- [9] HASANPOUR, R., CHOUPANI, N. Rock fracture characterization using the Arcan test specimen, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2) (2009), pp. 346–354
- [10] HOOVER, C. G., BAŽANT P. Z., VOREL, J., WENDNER, R., HUBLER, M. H. Comprehensive concrete fracture tests: Description and results, *Engineering Fracture Mechanics*, 114 (2013), pp. 92–103
- [11] KAI LU, TOSHIYUKI MESHII, Three-dimensional *T*-stresses for three-point-bend specimens with large thickness variation, *Engineering fracture mechanics* 116 (2014), pp. 197–203
- [12] KARIHALOO, B. L. Fracture mechanics of concrete. Longman Scientific & Technical, New York 1995
- [13] KARIHALOO, B. L., XIAO, Q. Z. Higher order terms of the crack tip asymptotic field for a wedge-splitting specimen, *International Journal of Fracture* 112 (2001), pp. 129–137.
- [14] KNÉSL Z., BEDNÁŘ K. Dvoupřímětová lomová mechanika: výpočet parametrů a jejich hodnoty, Brno: Ústav fyziky materiálů, AVČR, v. v. i. 1998
- [15] KNÉSL, Z.: Dvoupřímětová lomová mechanika a některé její aplikace, VUT v Brně VUTIUM 2000.
- [16] KUMAR, B., CHITSIRIPHANIT, S., SUN, C.T. Significance of *K*-dominance zone size and nonsingular stress field in brittle fracture, *Engineering Fracture Mechanics*, 78(9) (2011), pp. 2042–2051
- [17] KUNZ, J. Základy lomové mechaniky, ČVUT, 1994

- [18] KURUPPU, D. M., CHINY, KP. Fracture toughness testing of brittle materials using semi-circular bend (SCB) specimen, *Engineering Fracture Mechanics*, 91 (2012), pp. 133–150
- [19] LEEVERS, P.S., RADON, J.C. Inherent stress biaxiality in various fracture specimen geometries, *International Journal of Fracture*, 19 (1982), pp. 311–325
- [20] LINSBAUER, H.N., TSCHEGG, E.K. Fracture energy determination of concrete with cube-shaped specimens, *Zement und Beton* 31 (1986), pp. 38–40.
- [21] LÖFGREN, I., OLESEN J.F., FLANSBJER, M. Application of WST-method for fracture testing of fibre-reinforced concrete. NT Technical Report 575, 2006
- [22] MURAKAMI, Y., et al. Stress Intensity Factor Handbook I, II, III, Pergamon Press, 1987
- [23] OŽBOLT, J., BOŠNJAK, J., SOLA, E. Dynamic fracture of concrete compact tension specimen: Experimental and numerical study, *International Journal of Solids and Structures*, 50 (2013), pp. 4270–4278
- [24] RILEM Committee FMC 50, Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams, *Mater. Struct.* 18 (1985), pp. 285–290.
- [25] RILEM Committee FMT 89 Size effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete. *Mater Struct*, 23 (1990), pp. 461–465.
- [26] RILEM REPORT 5 Fracture Mechanics Test Methods for Concrete, Edited by S.P. Shah and A. Carpinteri and Hall, London, 1991.
- [27] SEITL, S., Dvoupárametrová lomová mechanika: Popis krátkých únavových trhlin, *Disertační práce, ÚFM AVČR a FSI VUT v Brně*, 2003, p. 103
- [28] SHAH, S. P., SWARTZ, S. E., OUYANG, CH. Fracture mechanics of structural concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock, and other quasi-brittle materials. John Wiley & Sons, Inc., New York. (1995)
- [29] TADA, H., PARIS, P.C. IRWIN G.R. The stress analysis of cracks handbook Paris Productions Incorporated (1985)
- [30] TSCHEGG, E. Republik Österreich. Patent number 390328B; (1986).
- [31] WAGONER, M.P., BUTTLAR, W.G., PAULINO, G.H., Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture, *Experimental Mechanics*, 45 (2005), pp. 270–277.
- [32] WILLIAMS, M. L. On the Stress Distribution at the Base of Stationary Crack, *Journal of Applied Mechanics*, 24 (1957), pp. 109–114
- [33] XIAON, J., SCHNEIDER, H., DONNECKE, C., KONIG, G. (2004) Wedge splitting test on fracture of ultra high strength concrete, *Construction and Building Materials* 18 (2004), pp. 359–365.
- [34] XU, S., BU, D., GAO, H., YIN, S., LIU, Y. Direct measurement of double- K fracture parameters and fracture energy using wedge-splitting test on compact tension specimens with different size, proceedings of *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures – New Trends in Fracture*, Catania, Italy, (2007), pp. 271–278.

SEZNAM AUTOROVÝCH PUBLIKACÍ ZAMĚŘENÝCH NA DISKUTOVANOU PROBLEMATIKU

- [A1] SEITL, S., KLUSÁK, J., KERŠNER, Z. Vliv šířky zářezu na růst trhliny pro různé konfigurace vzorků pro třibodový ohyb. The influence of a notch width on a crack growth for various configurations of three-point bending specimens. *Materials Engineering / Materiálové inžinierstvo*, roč. XIV, č. 3/2007, pp. 213–219, ISSN 1335-0803
- [A2] SEITL, S., KLUSÁK, J., KNĚSL, Z., KERŠNER, Z. Influence of notch geometry on fracture behaviour of three-point bend notched specimens from quasi-brittle materials. In: proceedings of *Third International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation – Recent Developments in Structural Engineering, Mechanics and Computation* (Book of extended abstracts + DVD-ROM), Cape Town, South Africa, 10–12 September 2007. A. Zingoni (Ed.). Rotterdam: Millpress Science Publishers, 245–246 + DVD 4 p. ISBN 978-90-5966-054-0;
- [A3] SEITL S., KLUSÁK, J. KERŠNER, Z., KNĚSL Z., Evaluation of notch geometry effect on behaviour of fracture toughness testing specimen, *Engineering mechanics 2007*, May 14-17., Svratka, (2007) (On CD)
- [A4] SEITL, S., KNĚSL, Z., Two parameter fracture mechanics: Fatigue crack behavior under mixed mode conditions, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 75, Issues 3–4, (2008), pp. 857–865, ISSN: 0013-7944
- [A5] SEITL, S., KLUSÁK, J., KERŠNER, Z. Influence of notch width and length on crack initiation in 3PB specimens. In proceedings of *Engineering mechanics 2008* (Book of extended abstracts + CD ROM), Svratka, 12–15 May 2008. V. Fuis and M. Pásek (Eds.). Prague: Institute of Thermomechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, v.v.i. 807–811 + CD 8 p. ISBN 978-80-87012-11-6
- [A6] SEITL, S., ŘOUTIL, L., KLUSÁK, J., VESELÝ, V. The influence of the shape of a saw-cut notch in quasi-brittle 3PB specimens on the critical applied force, *Applied and Computational Mechanics* 2 (1), (2008), pp. 123–132, ISSN: 1802-680X
- [A7] SEITL, S., VESELÝ, V., ŘOUTIL, L. (2009d) Numerical analysis of crack tip stress field for wedge splitting geometry. In: *Proceedings o conference Applied Mechanics* (Book of abstracts + CD ROM), Smolenice, Slovakia, 6–8 April 2009. R. Janco (Editor), Institute of Applied Mechanics and Machatronics, Faculty of Mechanical Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava and Institute of Materials and Machine Mechanics, Slovak Academy of Sciences in Bratislava, 2009, 77–78 + CD 270–278, ISBN 978-80-89313-32-7
- [A8] SEITL, S., DYMÁČEK, P., KLUSÁK, J., ŘOUTIL, L., VESELÝ, V. (2009c) Two-Parameter Fracture Analysis of Wedge Splitting Test Specimens. In: *Proceedings of the Twelfth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, Funchal, Portugal, 1–4 September 2009. B.H.V. Topping, L.F. Costa Neves, R.C. Bartoš 208 (Editors), Civil-Comp Press, Stirlingshire, United Kingdom, paper 192 (10 p.), 2009. doi:10.4203/ccp.91.192, ISBN 978-1-905088-32-4, ISSN 1759-3433
- [A9] SEITL, S., KLUSÁK, J., DYMÁČEK, P., ŘOUTIL, L., VESELÝ, V. (2009e) Vliv vertikální tlačné síly na úroveň constraintu v krychlovém vzorku pro klínové štípní, In: *Modelování v mechanice*, 19.–20. 5. 2009. VŠB-TU Ostrava, Fakulta stavební, Ostrava, 2009, 21–22 + CD 9 str., ISBN 978-80-248-2016-3.
- [A10] ŘOUTIL, L., VESELÝ, V., SEITL, S. (2010b) Numerical study of wedge-splitting test on concrete specimens, In *Proceedings of conference Applied Mechanics*, TU Liberec, p. 107– 110, ISBN 978-80-7372-586-0.

- [A11] ŘOUTIL, L., VESELÝ, V., SEITL, S., KLUSÁK, J. (2010e) Posouzení geometrie zkušebního tělesa pro WST kvazikřehkých kompozitů: Numerická studie, In *Křehký lom 2010 (Design a porušování materiálů)*, Brno, p. 201–212, ISBN 978-80-87434-01-7
- [A12] SEITL, S., FERNÁNDEZ-ZUÑIGA, D., FERNÁNDEZ-CANTELI, A. Using a tensor model for analyzing some aspects of mode-II loading, *Applied and Computational Mechanics*, Vol 5, No. 1 (2011), pp. 55–66, ISSN 1802-680X
- [A13] VESELÝ, V., ŘOUTIL, L., SEITL, S., Wedge-Splitting Test – Determination of Minimal Starting Notch Length for Various Cement Based Composites Part I: Cohesive Crack Modelling, *Key Engineering Materials* Vols. 452–453, (2011), pp. 77–80, ISSN: 1662-9795
- [A14] SEITL, S., KLUSÁK, J., VESELÝ, V., ŘOUTIL, L., Wedge-Splitting Test – Determination of Minimal Starting Notch Length for Various Cement Based Composites Part II: Crack and Notch Fracture Mechanics Approaches, *Key Engineering Materials*, Vols. 452–453, (2011), pp. 81–84, ISSN: 1662-9795
- [A15] SEITL, S., VESELÝ, V., ŘOUTIL, L., Two-parameter fracture mechanical analysis of a near-crack-tip stress field in wedge splitting test specimens, *Computer & Structure*, Vol. 9, Issues 21–22, (2011), pp. 1852–1858, ISSN: 0045-7949
- [A16] SEITL, S., HUTAŘ, P., GARCÍA, T., CANTELI, A., Experimental and numerical analysis of in- and out- plane constraint effects on fracture parameters: Aluminium alloy 2024, *Applied and Computational Mechanics* 7, (2013), pp. 53–64, ISSN: 1802-680X
- [A17] FERNANDEZ-CANTELI, A., CASTAÑÓN, L., GARCIA-NIETO, B., HOLUSOVA, T., SEITL, S., Determining fracture energy parameters of concrete from the modified compact pension test, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 30 (2014) pp. 383–393; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.30.46
- [A18] SEITL, S., BERMEJO, C., SOBEK, J., VESELÝ, V., Two Parameter Description of Crack Tip Stress Fields for Wedge Splitting Test Specimen: Influence of Wedge Angle, *Advanced Materials Research* Vol. 969 (2014) pp 345–350, © (2014) Trans Tech Publications, Switzerland, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.969.345
- [A19] SEITL, S., KORTE, S., DE CORTE, W., BOEL, V., SOBEK, J., VESELÝ, V. Selecting a suitable specimen shape with low constraint value for determination of fracture parameters of cementitious composites, *Key Engineering Materials*, (2014) Vols. 577–578, pp. 481–484, ISSN: 1662-9795
- [A20] SEITL, S., NIETO GARCIA, B., MERTA, I. Wedge splitting test method: Quantification of influence of blues marble plates by two-parameter fracture mechanics, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 30 (2014) 174–181, DOI: 10.3221/IGF-ESIS.30.23
- [A21] VESELÝ, V., FRANTÍK, P., SOBEK, J., MALÍKOVÁ (ŠESTÁKOVÁ), L., SEITL, S. Multi-parameter crack tip stress state description for evaluation of nonlinear zone width in silicate composite specimens in component splitting/bending test geometry, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, (2014)
- [A22] VESELÝ, V., SOBEK, J., FRANTÍK, P. ŠTAFKA, M., ŠESTÁKOVÁ, L., SEITL, S. Estimation of the zone of failure extent in quasi-brittle specimen with different crack-tip constraint conditions from stress field, *Key Engineering Materials*, Vols. 592–593, (2014), pp. 262–265
- [A23] SEITL, S., MERTA, I., VESELÝ, V., Wedge splitting test of foam concrete specimens: Calibration curves, *Key Engineering Materials* Vol. 627 (2015), pp. 281–284, © (2015) Trans Tech Publications, Switzerland, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.627.281

ABSTRAKT

Předkládaná habilitační práce vznikla v rámci mé úzké spolupráce s Fakultou stavební VUT v Brně a jejím obsahem jsou výsledky, které jsem dosáhl ve sledované oblasti dvouparametrového lomové mechanického popisu stability trhlin s aplikací na cementové kompozity.

Práce je uvedena základními pojmy z teorie lomové mechaniky, její koncepcí, vysvětlením výhod dvouparametrového popisu, metodikou výpočtu lomové mechanických parametrů pomocí software ANSYS a jejich aplikací pro posouzení integrity konstrukcí. Prezentované výsledky této práce lze shrnout do čtyř částí souvisejících s experimentálními konfiguracemi pro určování lomově-mechanických charakteristik konstrukčních i jiných materiálů, a to test tříbodovým ohybem, test klínovým štípáním, modifikovaný test excentrickým tahem a test kombinovaným namáháním štípáním klínem a tříbodovým ohybem.

ABSTRACT

Presented habilitation thesis was created within my close collaboration with the Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology and contents results that I have achieved in the field of two-parameter fracture mechanical description of stability of cracks in application to cement based composites.

The work introduces the basic concepts of theory of fracture mechanics, its conceptions, explains benefits of application two-parameter description, shows the methodology of calculation of fracture mechanics parameters in software ANSYS and their application in structural integrity assessment. Presented results of this work can be summarized into four parts associated with experimental configurations for determination of fracture mechanical characteristics, particularly the three-point bending test, test wedge splitting test, the modified compact tension and the test with component wedge splitting and three-point bending loading.