

EVALUATION OF NOTCH GEOMETRY EFFECT ON BEHAVIOUR OF FRACTURE TOUGHNESS TESTING SPECIMEN

S. Seitl¹, J. Klusák¹, Z. Keršner², Z. Knésl¹

Summary: *The basic fracture properties of cement-based composite are ascertained on the basis of test evaluations of the specimens in suitable test configurations. Three-point bending specimens with a central starting notch are the most frequently used specimens for laboratory testing. Through models of equivalent elastic cracks the critical crack length and effective fracture toughness (or toughness) can be calculated. The influence of the geometry of the starting notch in a three-point bend specimen on the resulting values of critical applied force and fracture toughness is studied in this paper. To this end, a crack initiation at the notch tip is numerically simulated. It is shown that the values of fracture toughness obtained for specimens with larger widths of starting notch can be overestimated.*

1. Úvod

Při experimentálním určování kritických hodnot lomově-mechanických parametrů je nezbytné ve zkušebních tělesech iniciovat počáteční trhlinu definované délky. I když bývá geometrie zkušebních těles včetně iniciačních vrubů předepsána normami, resp. doporučeními, dochází při výrobě vzorků k celé řadě nepřesností, které spolu s heterogenitou materiálů vedou k velkému rozptylu výsledných hodnot. V některých případech mohou být takto získané výsledky nepoužitelné.

V příspěvku je analyzován vliv geometrie počátečního vrubu ve vzorcích pro tříbodový ohyb používaných pro odhady lomové houževnatosti a dalších lomových parametrů materiálů s matricí na bázi cementu (Karihaloo, 1995). V těchto případech bývá počáteční vrub (zářez) vyroben diamantovou kotoučovou pilou a za rozhodující parametry lze považovat hloubku vrubu, jeho šířku a tvar vrcholu vrubu, kde je trhlina iniciována. Na základě výpočtů metodou konečných prvků se analyzuje, resp. diskutuje, vliv těchto proměnných parametrů na iniciaci počáteční trhliny. Simuluje se šíření počáteční trhliny z vrcholu vrubu s ohledem na možné geometrické odchylky od standardního tvaru, přičemž se sleduje především vliv šířky vrubu na chování vzorků za podmínek odpovídajících laboratorní zkoušce a je analyzován tento vliv na získané hodnoty lomové houževnatosti.

V předkládaném příspěvku si tedy autoři kladou za cíl kvantifikovat vliv počátečního zářezu (vrubu) vzorků na stanovování velikosti lomově-mechanických veličin při zkoušce tříbodovým ohybem.

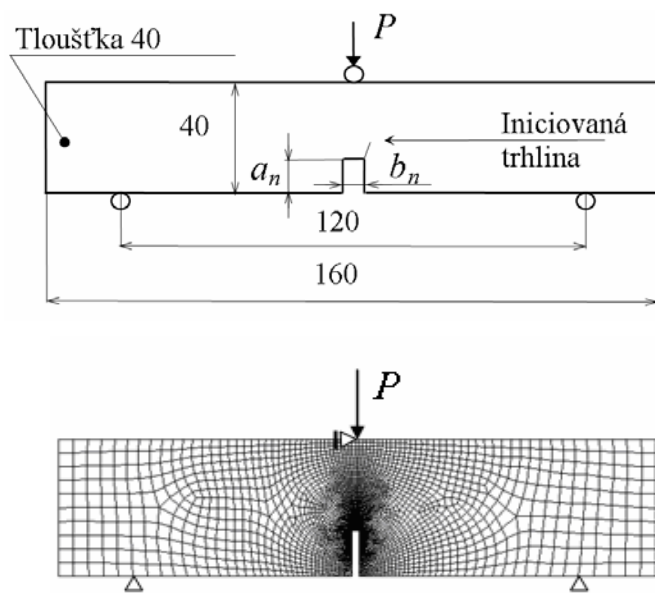
¹ Ing. Stanislav Seitl, Ph.D., prof. RNDr. Zdeněk Knésl, CSc., Ing. Jan Klusák, Ph.D., Ústav fyziky materiálů, Akademie věd České republiky, v.v.i., Žitkova 22, 616 62 Brno; tel.: +420-532 290 348, e-mail: seitl@ipm.cz

² doc. Ing. Zbyněk Kersner, CSc., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, VUT v Brně; tel.: +420-541 147 362, e-mail: kersner.z@fce.vutbr.cz

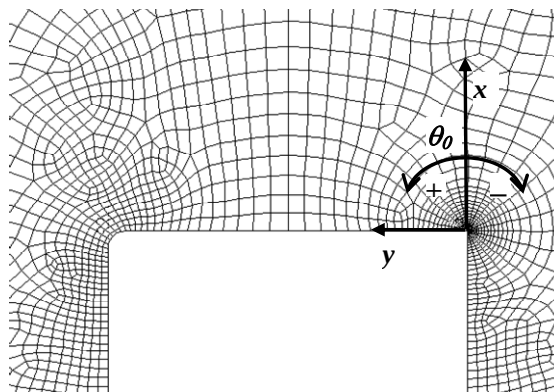
Poznamenejme, že článek navazuje na práci stejných autorů (Seitl et al., 2007), ve kterém se věnuje pozornost zejména presentaci dosažených výsledků. V tomto příspěvku se autoři zaměřují především na postupy používané k výpočtu jednotlivých lomově-mechanických veličin.

2. Numerický model

V průběhu experimentálního určování lomové houževnatosti se ukázalo, že se trhлина při uvedené tříbodové konfiguraci zkoušky iniciuje z jednoho vrcholu vrubu (koncentrátoru napětí), což je uvedeno na obr. 1 (resp. obr. 7). Níže se proto budeme zabývat právě uvedenou konfigurací. V jednom z prvních kroků se autoři věnují především modelování uvedené konfigurace v rámci dvou-dimenzionálních (2D) výpočtů metodou konečných prvků (MKP). Předpokládá se – při uvedené tloušťce tělesa (40 mm) – stav rovinné deformace. Pro výpočty byly dále uvažovány předpoklady lineárně elastické lomové mechaniky s následujícími typickými hodnotami materiálových charakteristik: Youngův modul $E=20$ GPa, Poissonovo číslo $\nu=0,3$; pro stanovení kritických napětí a síly uvažujeme pro zatvrdlou cementovou pastu hodnotu lomové houževnatosti $K_{IC}=1$ MPa.m^{1/2}. Numerické výpočty byly provedeny ve dvou MKP programech: ANSYS a FRANC2D. Typická síť použitá při numerických simulacích je uvedena na obr. 1. Na obr. 2 lze nalézt detail sítě v blízkosti vrcholu zářezu, který je modelován na jedné straně ostrým vrubem a na straně druhé vrubem se zaoblením $r=0,01$ mm z důvodu dosažení reálných podmínek pro iniciaci trhliny z jedné strany zářezu. Na obrázku je současně uveden souřadný systém a úhlová konvence pro trhlinu iniciující se ve vrcholu ostrého vrubu.



Obr. 1 Schéma konfigurace zkoušky tříbodovým ohybem vzorku s centrálním zářezem (nahore; rozměry v mm) a ilustrace sítě prvků numerického MKP modelu.



Obr. 2 Detail sítě konečných prvků v blízkosti vrcholu vrubu s vyznačením souřadné soustavy a úhlové konvence iniciované trhliny ($b_n=2$ mm).

Rozměrově model odpovídá standardním vzorkům používaným při tříbodových zkouškách zatvrdlé cementové pasty či kompozitů s maximální velikostí částic 4 mm (viz obr. 1), přičemž hloubka zářezu činí $a_n=13$ mm a odpovídající poměr a_n ku výšce vzorku W je přibližně 1/3. Jednotlivé modely těles s různou šířkou zářezu b_n obsahovaly okolo 10000 isoparametrických elementů s 6 nebo s 8 uzly. Typická velikost elementu v blízkosti vrcholu ostrého vrubu byla 4×10^{-3} mm.

První krok představovalo stanovení podmínek iniciace trhliny z ostrého vrcholu vrubu. Kritickou aplikovanou silou P_C budeme dále rozumět zatížení, při němž dochází z vrcholu zářezu k iniciaci trhliny.

Na základě numerického modelování zkušebního tělesa se zářezem byly v ostrém vrubu stanoveny hodnoty zobecněných součinitelů intenzity napětí H_I a H_{II} . Tyto hodnoty byly vypočteny pomocí přímé metody srovnáním numericky zjištěných hodnot tangenciálního napětí s analytickým vyjádřením této veličiny (Klusák et al., 2002). Poměru stanovených hodnot H_{II}/H_I jednoznačně odpovídá předpokládaný směr iniciace trhliny θ_0 (Klusák et al., 2007).

Pro výpočet kritické aplikované síly je nutné kromě hodnot zobecněných součinitelů intenzity napětí znát i jejich kritickou hodnotu. Vzhledem k tomu, že pro iniciaci trhliny je rozhodující zatěžovací mód I, vyjdeme pro určení kritických podmínek z hodnoty lomové houževnatosti K_{IC} , na jejímž základě vyjádříme kritickou hodnotu H_{IC} . Tato hodnota se určí například pomocí kritéria střední hodnoty napětí před vrcholem vrubu (Knésl, 1991). Poznamenejme, že pro kombinovaný mód zatížení v sobě kritická hodnota H_{IC} zahrnuje i příspěvek jednotlivých módů zatěžování (Klusák et al., 2007):

$$H_{IC} = 2K_{IC} \sqrt{\left(\frac{d^{\frac{1}{2}-p_I}}{1-p_I} F_{\theta\theta I}(\theta_0) + h \frac{d^{\frac{1}{2}-p_{II}}}{1-p_{II}} F_{\theta\theta II}(\theta_0) \right)} \quad (1)$$

kde $p_I=0,4555$ a $p_{II}=0,0915$ jsou exponenty singularity napětí pro jednotlivé zatěžovací módy, $F_{\theta\theta I}(\theta_0)$ a $F_{\theta\theta II}(\theta_0)$ jsou tvarové funkce ze vztahů pro rozložení napětí v okolí ostrého vrubu určené pro hodnoty předpokládaných úhlů iniciace θ_0 a d je vzdálenost, přes kterou je počítáno střední napětí. Hodnota $h = \frac{H_{II}}{H_I} = \frac{H_{IIc}}{H_{Ic}}$ vyjadřuje příspěvek jednotlivých

zatěžovacích módů pro konkrétní konfiguraci. Vzhledem ke skutečnosti, že se změnou absolutní velikosti zatížení zůstává zatěžovací mód stejný a zároveň poměr hodnot $H_{II}/H_I = \text{konst.}$, je zřejmé, že bude tento poměr stejný i v případě kritických hodnot H_{IC} a H_{IIC} .

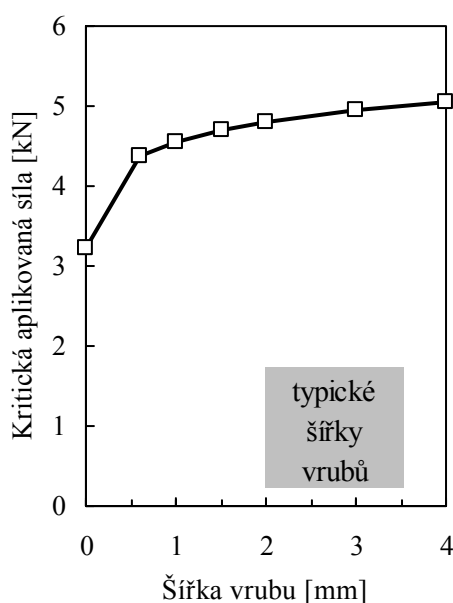
Pro výpočet velikosti zatěžovací síly implikující iniciaci trhliny použijeme vztah vycházející ze srovnání hodnot H_I a H_{IC} :

$$P_c = P \frac{H_{IC}}{H_I(P)} \quad (2)$$

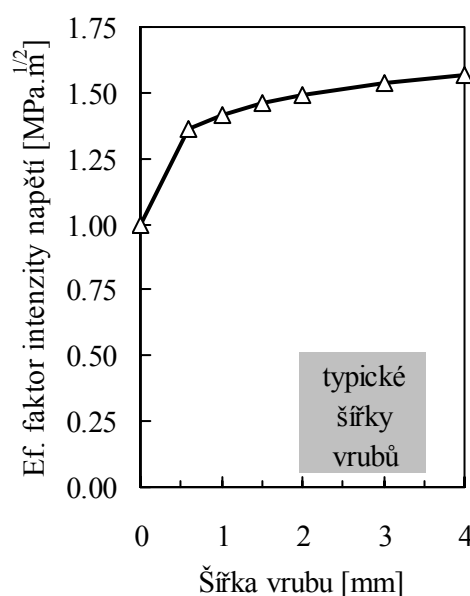
Ve druhém kroku byl modelován růst trhliny, přičemž počáteční směr θ_0 byl určen ze závislosti na poměru H_{II}/H_I v rámci stanovení podmínek iniciace – viz předchozí odstavec. Pro výpočet lomově-mechanických parametrů trhliny (součinitelů faktoru intenzity napětí K_I , K_{II}) byla použita standardní procedura KCALC využívající posunutí středového uzlu, která je implementovaná přímo v programu ANSYS, nebo z posunutí líce trhliny vypočtených v programu FRANC2D. Trhlina byla modelována s přírůstkem 1 mm. Pro stanovení předpokládaného směru šíření trhliny bylo v každém kroku použito kritérium maximálního tangenciálního napětí (MTS, Erdogan & Sih, 1963), které je součástí programu FRANC2D.

3. Numerické výsledky

Výsledky numerických analýz jsou uvedeny v následujících obrázcích, přičemž za proměnnou se uvažovala šířka vrubu b_n v rozmezí od 0 (případ trhliny) do 4 mm. Nejprve byla vypočtena kritická aplikovaná síla (viz obr. 3) a posléze odpovídající efektivní faktor intenzity napětí (obr. 4) v závislosti na počáteční šířce vrubu.

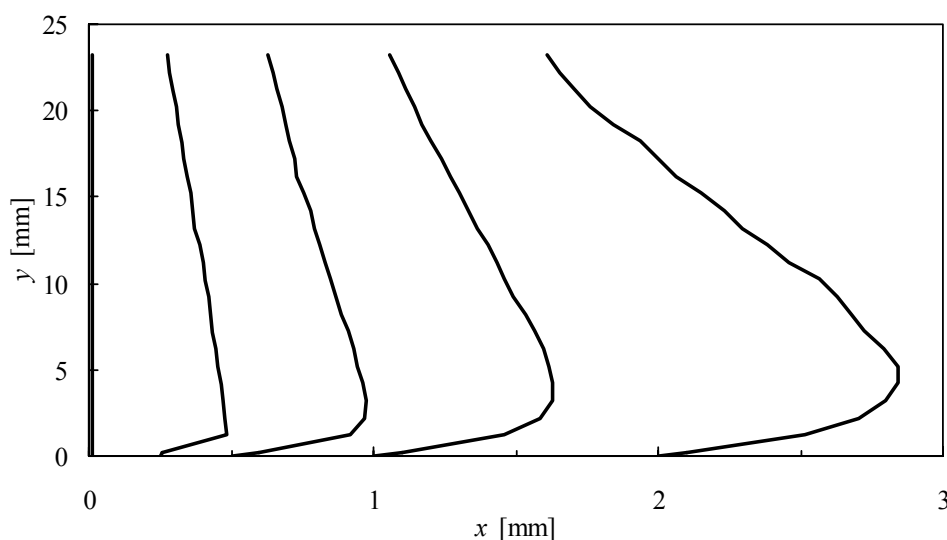


Obr. 3 Kritická aplikovaná síla versus šířka vrubu.

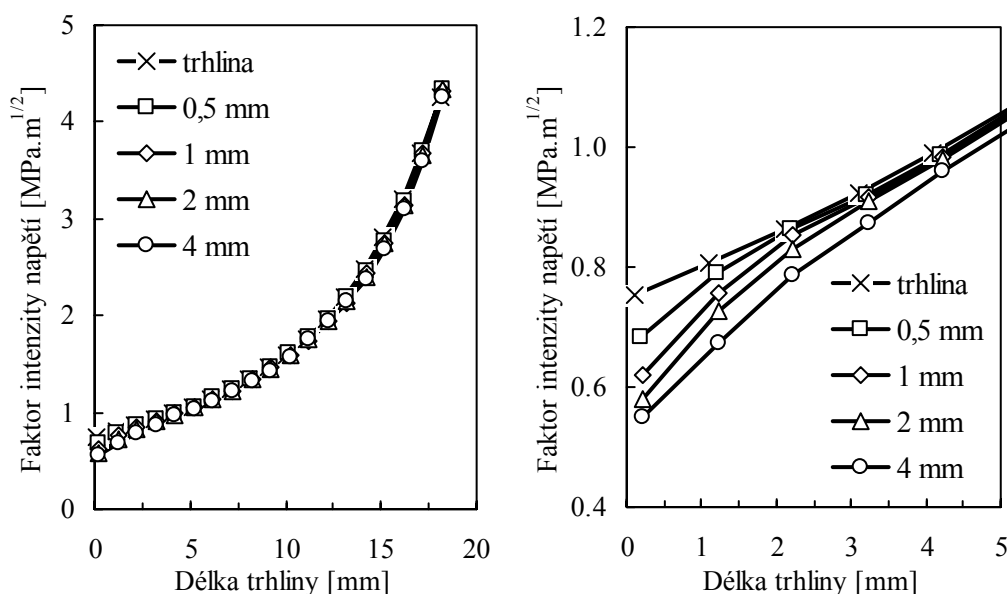


Obr. 4 Efektivní faktor intenzity napětí versus šířka vrubu.

Po stanovení podmínek iniciace trhliny z ostrého vrubu bylo ve druhém kroku analyzováno chování trhliny z něho rostoucí. Na obr. 5 jsou uvedeny dráhy trhlín, které se iniciovaly z ostrých vrubů; pro srovnání se zde uvádí také dráha pro ideální trhlínu a ta na daném obrázku odpovídá $x=0$. Je vidět, že trhlíny se iniciují směrem od zářezu a v poměrně krátké vzdálenosti se stočí ke středu, resp. k linii hrany vrubu, a dále pak rostou proti zatěžující síle. Zřejmě by tedy měl být ovlivněn průběh K -kalibrační křivky, viz obr. 6 (závislost je uvedena pro skutečné délky trhlín a rostoucí z jednotlivých ostrých vrubů), pro srovnání obsahuje také K -kalibrační křivku pro trhlínu. Z grafu lze vyvodit, že hodnota součinitele intenzity napětí K se mění pouze v počátku růstu trhliny a od délky $a=5$ mm jsou hodnoty K takřka identické – viz detail v obr. 6 vpravo. Poznamenejme, že hodnota součinitele intenzity napětí pro mód II byla blízká nule.



Obr. 5 Dráhy trhlín, které se iniciovaly z ostrých vrubů, resp. z trhliny.



Obr. 6 K -kalibrační křivky pro vyšetřované šířky vrubu b_n (trhlina odpovídá hodnotě $b_n=0$ mm), vpravo detail počátečního průběhu.

4. Oblast aplikace

Ve stavební praxi se dlouhodobě masivně uplatňují cementové kompozity, které zařazujeme mezi kvazikřehké materiály vzhledem k projevům tahového změkčení ve zjišťovaných závislostech síla–posun. Mezi velmi perspektivní třídu materiálů nosných stavebních konstrukcí lze řadit např. vysokohodnotný beton, kompozity ultravysokých pevností na bázi ultrajemných reaktivních složek apod. (Aitcin, 1998/2005). Tyto pokročilé stavební materiály doplňují dále např. bezslínkovými kompozity či geopolymery, jejichž předností je šetrnost k životnímu prostředí.

Akcentovaným aspektem jsou u zmíněných pokročilých materiálů značně vysoké hodnoty jejich mechanických vlastností, naproti tomu však stojí problematika trvanlivosti, resp. životnosti stavebních konstrukcí z těchto materiálů. Případné havárie takovýchto stavebních konstrukcí bývají totiž typicky spojeny se vznikem a šířením trhlin, proto vyšetřování lomového chování pokročilých kompozitů patří k aktuálním oblastem základního výzkumu těchto stavebních materiálů.

Připomeňme, že při zatěžování konstrukcí dochází k velkým koncentracím napětí v okolí mikroporuch v materiálu (mikrotrhliny, póry a jiné nehomogenity), které jsou pro uvedené pokročilé kompozity charakteristické. K porušení konstrukcí dochází vytvořením velkých trhlin a lomů po vyčerpání únosnosti, což je předcházeno vznikem a formováním tzv. lomových procesních zón. Proto se při návrhu či posouzení únosnosti a použitelnosti těchto konstrukcí, ani při oceňování jejich životnosti nelze obejít bez relevantních hodnot parametrů, které kvantifikují odolnosti materiálu proti šíření trhlin – např. lomová houževnatost.

Hodnoty lomově-mechanických parametrů se zjišťují na základě vyhodnocení testů na zkušebních tělesech ve vhodné konfiguraci, kterou nejčastěji bývá právě třibodový ohyb vzorků s centrálním zářezem v oblasti tažených vláken. Zatěžování při tom probíhá s požadavkem konstantního posunu a zaznamenává se diagram zatížení–posun. Pomocí modelů ekvivalentní elastické trhliny (Karihaloo, 1995) lze vyčíslit kritickou délku efektivní trhliny a efektivní lomovou houževnatost (resp. houževnatost).

5. Diskuse výsledků

Jak vyplývá z výše uvedeného, je problematika experimentálního určování kritických hodnot lomově-mechanických parametrů pokročilých stavebních materiálů velmi aktuální. Nepřesnosti v geometrii používaných zkušebních těles včetně iniciačních vrubů spolu s heterogenitou cementových kompozitů vedou k velkému rozptylu výsledných hodnot. Získané výsledky ukazují, že zejména v počátečním stadiu zatěžování vzorků může být rozhodující geometrie iniciačního vrubu, především jeho šířka.

Konfigurace zmíněné lomové zkoušky byla simulována metodou konečných prvků. Zářez vyráběný u vzorků před testem diamantovou pilou byl modelován jako vrub se dvěma vrcholy, přičemž ve shodě s experimentálními poznatky byl zaveden předpoklad šíření trhliny pouze v jednom z nich, viz obr. 2 (model) a 7 (experiment).

Bylo vyšetřováno lomové chování těchto vzorků s ohledem na proměnnou šířku startovacího zářezu. Uvažovaný vrchol vrubu byl modelován jako obecný singulární koncentrátor napětí a pro jeho popis byla použita metoda modifikované lineární elastické lomové mechaniky. Výsledek představuje závislost mezi šířkou vrubu a iniciačním zatížením potřebným pro vznik trhliny. Tato trhlina se následně šíří jako makrotrhlina ligamentem

vzorku a v konečné fázi vede k jeho rozlomení. Iniciační zatížení narůstá se šířkou vrubu, přičemž k největším změnám dochází v oblasti úzkých vrubů, viz obr. 3. Pro typické šířky vrubů (2–3,5 mm) je tato závislost již nevýrazná – ukazuje se tedy jako nepodložené doporučení např. v Karihaloo (1995), aby šířka zářezu nepřekračovala velikost 3 mm. Stejný charakter má i závislost efektivní hodnoty faktoru intenzity napětí, viz obr. 4, z čehož plyne zřejmé nadhodnocení určených hodnot efektivní lomové houževnatosti pro typicky používané šířky zářezů (až o 50%). Na druhé straně výsledky ukázaly, že šíření takto iniciované makrotrhliny ligamentem vzorku není, s výjimkou počátečního stadia, ovlivněno šířkou zářezu a trhlina se v konečné fázi šíří kolmo na zatěžovaný povrch vzorku.



Obr. 7 Ilustrační detail vrubu ve vzorku z cementového kompozitu, vytvořeného diamantovou kotoučovou pilou; trhlina se iniciuje v jednom z vrcholů vrubu a šíří se skrze vzorek.

6. Závěr

V příspěvku byl studován vliv geometrie vrubu na lomové chování vzorku se zářezem/vrubem namáhaného třibodovým ohybem. Byl vytvořen model a provedeny odpovídající výpočty metodou konečných prvků, kterých se použilo při studiu vlivu geometrie vrubu na iniciační trhlinu a následný její růst.

Dosažené výsledky lze shrnout do následujících bodů:

- Šířka startovacího vrubu ovlivňuje kritické iniciační zatížení a hodnotu efektivního faktoru intenzity napětí. Vypočtené hodnoty efektivní lomové houževnatosti mohou být pro typické šířky vrubu nadhodnoceny až o 50%.
- Šíření iniciované makrotrhliny ligamentem vzorku je šířkou vrubu ovlivněno jen v počátečním stadiu, trhlina se v konečné fázi šíří kolmo na zatěžovaný povrch vzorku.
- Naznačenou analýzu lze použít k návrhu optimálního rozměru/šířky počátečního vrubu tak, aby naměřené/kalibrované hodnoty efektivní lomové houževnatosti byly reálné.

7. Poděkování

Tato práce vznikla za laskavé finanční podpory záměru Ústavu fyziky materiálů AV ČR, v.v.i. č. AVOZ 20410507 a grantového projektu GA ČR reg. č. 103/07/1276.

8. Literatura

- Aïtcin, P.-C. (1998) *High Performance Concrete*. E&FN SPON, London and New York; (2005) v českém jazyce v překladu V. Bílka.
- ANSYS, Users Manual (2002) Version 6.1, Swanson Analysis System, Inc., Houston, Pennsylvania.
- Erdogan, F. & G.C. Sih (1963) On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *Journal of Basic Engineering*, 85, 519–527.
- FRANC2D A Crack Propagation Simulator for Plane Layered Structures, <http://www.cfg.cornell.edu>.
- Karihaloo, B.L. (1995) *Fracture mechanics of concrete*. Longman Scientific & Technical, New York.
- Klusák, J., Knésl, Z. & Náhlík, L. (2007) Crack initiation criteria for singular stress concentrations, Part II: Stability of sharp and bi-material notches, *Engineering mechanics*, v tisku.
- Klusák, J. & Knésl, Z. (2002) Evaluation of the threshold values for the propagation of a fatigue crack starting at a V-notch. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Science*, 9 459–468.
- Knésl, Z. (1991) A criterion of V-notch stability, *International Journal of Fracture*, 48: (4) R79-R83.
- Seitl, S., Klusák, J., Knésl, Z., Keršner, Z. (2007) Influence of notch geometry on crack initiation and path under three-point bending of quasi-brittle materials, *Structural Engineering, Mechanics and Computation*, v tisku.