

LOMOVÁ HOUŽEVNATOST Z TŘÍBODOVÉHO OHYBU VZORKŮ Z KVAZIKŘEHKÝCH MATERIÁLŮ: KOREKCE VZHLEDEM K ŠÍŘCE ZÁŘEZU

FRACTURE TOUGHNESS OF QUASI-BRITTLE SPECIMENS USING THREE-POINT BENDING TEST: CORRECTION WITH RESPECT TO NOTCH WIDTH

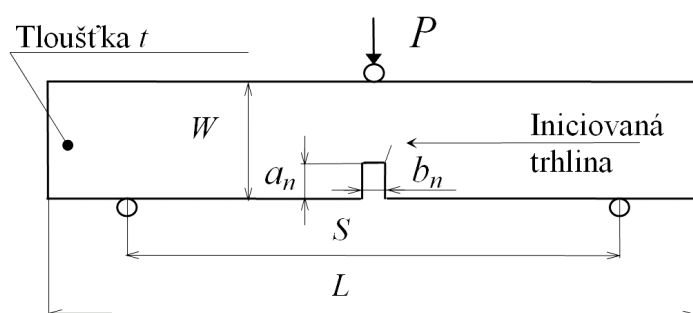
Petr Frantík¹, Zbyněk Keršner², Jan Klusák³, Stanislav Seitl⁴

ABSTRACT

The paper introduce the influence of the starting notch width on a crack growth in three-point bending specimens that are the most frequently used specimens for fracture laboratory testing, especially of quasi-brittle cement-based composites. There are analyses of three geometrically different configurations of the specimens. It is shown that the values of fracture toughness obtained from the tests of specimens with larger widths of the starting notch can be overestimated. Correction functions for selected testing configurations are presented.

1 ÚVOD

Experimenty pro získání hodnot lomově-mechanických veličin stavebních materiálů bývají prováděny na tvarově různých tělesech [1]. K nejpoužívanější konfiguraci patří zkouška ve tříbodovém ohybu vzorků tvaru trámce s centrálním zářezem – viz obr. 1. Magistrální trhlinka v takovém případě vzniká v místě zářezu/vrubu, viz např. [2]. Příspěvek se opírá o dříve provedené výpočty metodou konečných prvků, které analyzovaly vliv šířky zářezu pro různé geometrie vzorku/zkoušky na iniciaci počáteční trhliny. Tento vliv na získané hodnoty efektivní lomové houževnatosti autoři kvantifikují a na tomto základě zde uvádějí nalezené regresní funkce pro jeho korekci.



Obr. 1 Konfigurace zkoušky tříbodovým ohybem vzorku s centrálním zářezem [2]

¹ Petr Frantík, Ing., Ph.D., FAST VUT v Brně, Ústav stavební mechaniky, Veveří 331/95, 602 00 Brno, frantik.p@fce.vutbr.cz

² Zbyněk Keršner, doc. Ing., CSc., dtto, kersner.z@fce.vutbr.cz

³ Jan Klusák, Ing., Ph.D., Ústav fyziky materiálů, Akademie věd České republiky, v. v. i., Žižkova 22, Brno 616 62, klusak@ipm.cz

⁴ Stanislav Seitl, Ing., Ph.D., dtto, seitl@ipm.cz

2 NUMERICKÁ STUDIE A JEJÍ TEORETICKÉ POZADÍ

Při určování hodnot lomově mechanických parametrů kompozitů se silikátovou maticí se v závislosti na velikosti maximálního zrna kameniva ustálilo používání tří velikostí zkušebních těles. Jejich nominální rozměry uvádí tab. 1, přičemž označení rozměrů je v souladu s obr. 1. Hloubka zářezu a_n odpovídá u všech těles 1/3 výšky vzorku W .

Tab. 1 *Studované velikosti zkušebních těles lomových experimentů*

Označení	Rozměry v mm			
	t	W	L	S
A	40	40	160	120
B	80	80	480	400
C	100	100	400	300

V práci [2] byla tato sada vzorků analyzována s ohledem na chování při lomovém experimentu. Měnil se parametr šířka zářezu b_n v rozmezí od 0 do 6 mm (pro regresi je převzat interval 0 až 4 mm); nulová hodnota představovala teoretickou trhlinu. Nejprve byly stanoveny podmínky iniciace trhliny z ostrého vrcholu zářezu. Tato procedura v sobě zahrnuje stanovení hodnot zobecněných součinitelů intenzity napětí H_I , H_{II} , z jejichž poměru H_{II}/H_I je určen počáteční směr θ_0 iniciované trhliny a následně vypočtena kritická aplikovaná síla P_C odpovídající zatížení vzorku, při níž dojde ve vrcholu zářezu k iniciaci trhliny.

Následné modelování růstu trhliny vychází z počátečního směru šíření θ_0 (určeného ze závislosti na poměru H_{II}/H_I). Pro výpočet součinitelů intenzity napětí K_I , K_{II} posloužila procedura KCALC využívající posunutí středového uzlu, implementovaná v programu ANSYS [4]. Alternativou byl výpočet z posunutí líce trhliny určených v programu FRANC2D [5]. Pro stanovení předpokládaného směru šíření trhliny se v každém kroku použilo kritérium maximálního tangenciálního napětí [9], které je implementované v programu FRANC2D. Podrobnosti lze nalézt v [2, 3, 6, 7, 8].

Významný výsledek výše naznačené numerické analýzy pak představuje sada hodnot normalizovaného faktoru intenzity napětí $K_I/K_{I,(b_n=0)}$ v závislosti na šířce zářezu b_n – viz tab. 2; grafický průběh závislosti je možno vidět na obr. 2 a 3.

Tab. 2 *Hodnoty normalizovaného faktoru intenzity napětí pro tři velikosti zkušebních těles a různé šířky zářezu b_n*

b_n v mm	Zkušební tělesa/konfigurace		
	A	B	C
0	1	1	1
0.6	1.271884	1.237454	1.285888
1	1.339475	1.304314	1.356422
2	1.424851	1.389045	1.447194
3	1.470305	1.433601	1.496281
4	1.501198	1.462717	1.529346

3 REGRESE

Teoreticky zjištěné závislosti normalizované lomové houževnatosti lze užít k navržení korekčního postupu pro přepočtení výsledků reálného experimentu na referenční zářez o nulové šířce (trhlina). Byly navrženy dvě regresní funkce. První – y_{sqrt} – má tvar:

$$y_{sqrt}(b_n) = 1 - c_0(a^2 - 1), \quad a = \sqrt{0.001 - 1/(1000 + c_1 b_n)}, \quad (1)$$

kde c_0 a c_1 jsou její parametry. Druhá regresní funkce – y_{hyper} – má tvar:

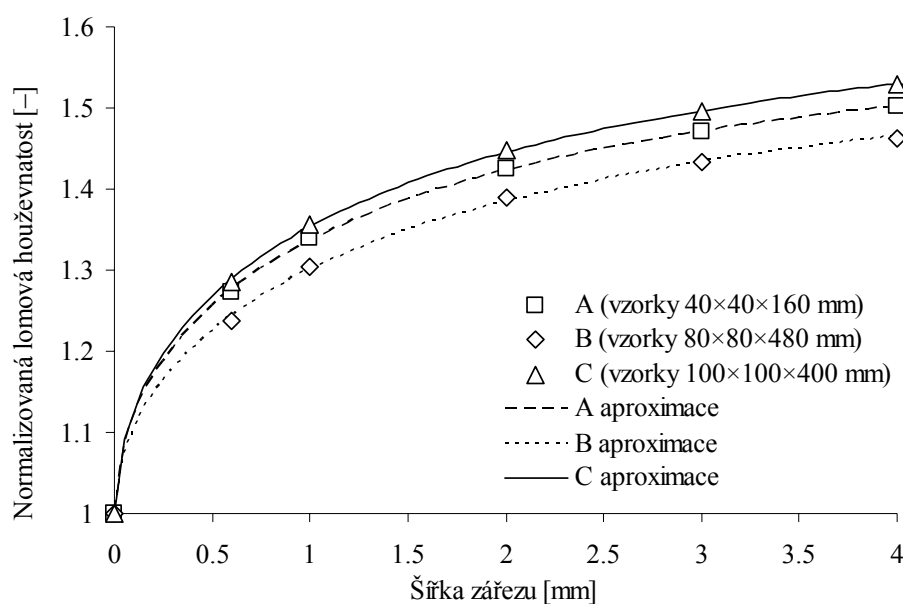
$$y_{hyper}(b_n) = 1 / (d_0 b_n + 1)^{d_1(1+d_2 b_n)}, \quad (2)$$

kde d_0 , d_1 a d_2 jsou parametry této funkce.

Vzhledem k nelineární závislosti funkcí na jejich parametrech byly tyto parametry hledány pomocí genetických algoritmů minimalizací čtverců odchylek. Samotná nelineární regrese ukázala, že výstižnější je funkce y_{hyper} , viz obr. 2 a 3. Její jednoduchost oproti funkci y_{sqrt} vyváží potřebu tří parametrů. Funkce y_{sqrt} byla zpočátku navržena se čtyřmi parametry, přičemž dva z nich se ukázaly konstantní pro dané geometrie s hodnotami 0.001 a 1000, viz vztah (1). Uvedme dále, že funkce y_{sqrt} je navržena tak, aby neměla v bodě $b_n = 0$ konečnou derivaci. Největší odlišnost obou funkcí lze nalézt pro zářezy se šířkou $b_n < 0.5$ mm. Hodnoty parametrů funkcí uvádí tab. 3.

Tab. 3 Parametry regresních funkcí

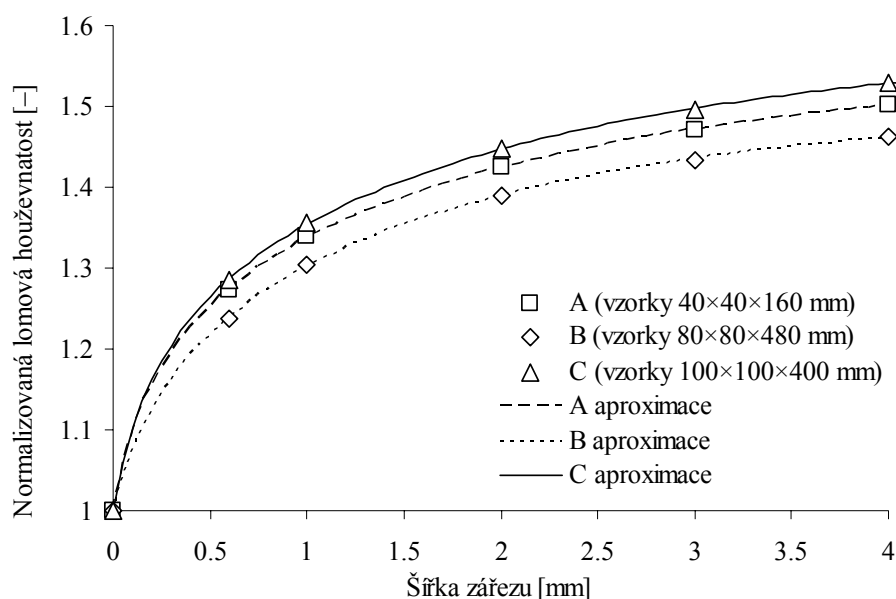
Označení	Parametry regresních funkcí pro šířku b_n v milimetrech (v metrech)				
	c_0	c_1	d_0	d_1	d_2
A	20.66	361.2 (361200)	13.89 (13890)	-0.1098	-0.02088 (-20.88)
B	20.15	286.8 (286800)	8.273 (8273)	-0.1221	-0.02990 (-29.90)
C	21.95	350.9 (350900)	13.35 (13350)	-0.1164	-0.02197 (-21.97)



Obr. 2 Vypočtené hodnoty normalizované lomové houževnatosti vs. šířka zářezu (nulová šířka odpovídá teoretické trhlině) pro velikosti vzorků A, B, C a jejich regrese funkcí y_{sqrt}

ZÁVĚR

V předkládaném příspěvku autoři uvedli dvě regresní funkce pro tři používané geometrie zkoušky třibodovým ohybem, které mohou sloužit pro výpočet korekce experimentálních výsledků prováděných na vzorcích s různou šířkou centrálního zářezu. Parametry regresních funkcí byly určeny pomocí aproximace hodnot získaných výpočtem [2]. Z hodnot uvedených funkcí v reálném rozsahu šířek zářezů vyplývá, že nadhodnocení lomové houževnatosti bez použití takovéto korekce může činit až asi 50%.



Obr. 3 Vypočtené hodnoty normalizované lomové houževnatosti vs. šířka zářezu (nulová šířka odpovídá teoretické trhlině) pro velikosti vzorků A, B, C a jejich regrese funkcí y_{hyper}

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce vznikla za finanční podpory projektů GA ČR č. 103/07/1276 a č. 101/05/0227.

LITERATURA

- [1] KARIHALOO, B. L. Fracture mechanics of concrete. Longman Scientific & Technical, New York, 1995.
- [2] SEITL, S., KLUSÁK, J. & KERŠNER Z. Vliv šířky zářezu na růst trhliny pro různé konfigurace vzorků pro tříbodový ohyb, *Materials Engineering*, Vol. 14, No. 3, 2007, 213–219.
- [3] SEITL, S., KLUSÁK, J., KNĚSL, Z. & KERŠNER. Z. Influence of notch geometry on crack initiation and path under three-point bending of quasi-brittle materials, Recent Developments in Structural Engineering, Mechanics and Computation, *Proceedings Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Cape Town, 2007, 245–246.
- [4] ANSYS, Users Manual, Version 6.1, Swanson Analysis System, Inc., Houston, Pennsylvania, 2002.
- [5] FRANC2D A Crack Propagation Simulator for Plane Layered Structures, <http://www.cfg.cornell.edu>.
- [6] KLUSÁK, J., KNĚSL, Z. & NÁHLÍK, L. Crack initiation criteria for singular stress concentrations, Part II: Stability of sharp and bi-material notches, *Engineering mechanics*, 2007 (v tisku).
- [7] KLUSÁK, J. & KNĚSL, Z. Evaluation of the threshold values for the propagation of a fatigue crack starting at a V-notch. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Science*, 9, 2002, 459–468.
- [8] KNĚSL, Z. A criterion of V-notch stability, *International Journal of Fracture*, 48: (4), 1991, R79–R83.
- [9] ERDOGAN, F. & SIH G. C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, *Journal of Basic Engineering*, 85, 1963, 519–527.