

Jiří KLON¹, Jakub SOBEK² a Václav VESELÝ³

NUMERICKÉ SIMULACE TESTU V BIAXIÁLNÍM OHYBU NA KŘÍŽOVÉM TĚLESE
Z KVAZIKŘEHKÉHO MATERIÁLU

NUMERICAL SIMULATIONS OF TEST UNDER BIAXIAL BENDING ON CRUCIFORM
SPECIMEN MADE OF QUASI-BRITTLE MATERIAL

Abstrakt

Příspěvek představuje numerickou studii vlivu vybraných vstupních parametrů materiálového modelu na průběh testu ve zkušební konfiguraci biaxiálního ohybu křížového tělesa s koncentrátorem napětí i bez něj, vyrobeného z kvazikřehkého materiálu. Jde konkrétně o tzv. Gilsocarbon grafit používaný jako moderátor jaderné reakce v reaktorech jaderných elektráren ve Velké Británii.

Klíčová slova

Biaxiální ohyb, křížové zkušební těleso, kvazikřehký lom, numerická simulace, model kohezivní trhliny.

Abstract

The paper is focused on a numerical study of the influence of selected input parameters of the used material model on the progress of a test in the configuration of biaxial bending of cruciform specimen with and without notch made of quasi-brittle material. In particular, the tested material is Gilsocarbon graphite that is used as a moderator of nuclear reaction in gas-cooled nuclear reactors in UK.

Keywords

Biaxial bending, cruciform test specimen, quasi-brittle fracture, numerical simulation, cohesive crack model.

1 ÚVOD

Široká použitelnost kvazikřehkých materiálů (např. cementových kompozitů, různých druhů keramiky, aj.) v různých prvcích stavebních konstrukcí z nich dělá kandidáty vhodné pro detailní analýzu jejich chování a optimalizaci různých stránek jejich návrhu a provedení (množství/cena/kvalita apod.). Jejich porušení souvisí s rozvojem trhlin. O vzniku a počátečních stádiích rozvoje trhliny, tj. iniciaci porušení konstrukce, se nedá přesvědčit pouze vizuálně, a to díky existenci rozsáhlé zóny u čela makroskopické trhliny, kde probíhá vlastní porušování. Díky „difuzní“ formě tohoto jevu lze na rozsah porušení z optického vjemu usuzovat až při dosti výrazném poškození materiálu. Mimo jiné proto se provádí testování těchto materiálů na zkušebních tělesech,

¹ Bc. Jiří Klon, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, e-mail: KlonJ@study.fce.vutbr.cz.

² Ing. Jakub Sobek, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, tel.: (+420) 541 147 116, e-mail: sobek.j@fce.vutbr.cz.

³ Ing. Václav Veselý, Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, tel.: (+420) 541 147 362, e-mail: vesely.v1@fce.vutbr.cz.

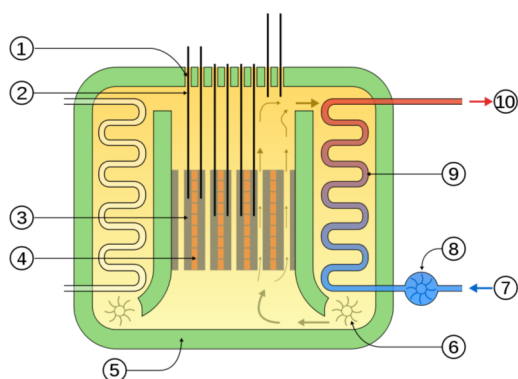
kdy se zachycuje odezva tělesa na působící zatížení až do jeho celkového zničení magistralní trhlinou probíhající celým průřezem.

K nejčastějším konfiguracím lomových zkoušek kvazikřehkých materiálů patří tzv. tříbodový ohyb [1] a test štípání klínem [2]. Provádějí se na tělesech s iniciačními zářezy – koncentrátory napětí. Zatížení je v uvedených zkouškách aplikováno jako jednoosé, hovoří se v této souvislosti o uniaxilitě těchto zkušebních geometrií. Tyto testy jsou relativně snadné na provedení a vyhodnocení, jehož výstupem jsou tzv. lomové parametry, použitelné při různých analýzách či srovnáních.

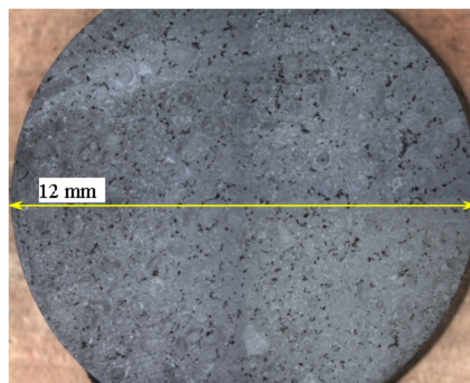
Trendem posledních let světového výzkumu porušování kvazikřehkých materiálů je však respektování prostorového zatížení [3]. Umožňuje to existence vhodných zkušebních zařízení a výpočetních nástrojů [4]. Účelem je pak zlepšování úrovně pokročilých materiálů a analýza nových (či dosluhujících) technologií, v nichž je kvazikřehký prvek podstatnou (nebo právě řídicí) částí. Pro aplikace sahající od procesorových a polovodičových součástek až např. po grafitové tyče v jaderných reaktorech je relevantní popis porušení kvazikřehkých materiálů klíčový.

Posouzení bezpečnosti a funkčnosti, potažmo odhad budoucího využití pokročilých jaderných elektráren (jaderná energie je neodmyslitelně součástí řešení dnešní energetické situace a jistě jí v blízké budoucnosti nadále zůstane) patří mezi výzkumné úkoly zásadní důležitosti. V souvislosti s pokročilými jadernými elektrárnami ve Velké Británii (VB), označovanými zkratkou AGRs (Advanced Gas-cooled nuclear Reactors, ve VB je jich čtrnáct), probíhá na univerzitách v Bristolu, Manchesteru, Sheffieldu a Oxfordu výzkum degradace a porušování tzv. Gilsocarbon grafitu [5,6], což je kvazikřehký materiál užívaný v reaktorech zmíněných jaderných elektráren jako moderátor jaderné reakce. Odlišnost oproti běžným jaderným reaktorům spočívá v chladicím médiu, které odvádí teplo vytvořené při jaderné reakci (Obr. 1). Voda byla nahrazena plynem – oxidem uhličitým (CO_2).

Gilsocarbon grafit (Obr. 2) ve formě bloků (modely ve zmenšeném měřítku zobrazeny na Obr. 3) uložených v reaktoru (zmenšený model na Obr. 4) zde plní funkci moderátoru jaderné reakce (látka sloužící ke zpomalení neutronů) a je vystaven množství různých typů zatížení (velká teplota a tlak; radiolytická oxidace; apod.), které mají nezanedbatelný vliv na rozložení napětí v objemu grafitových bloků během jejich životnosti a následnou degradaci/porušení. Obecný grafit je tvořen čistě z uhlíku (C – Werner, rok 1789 [7]), zatímco Gilsocarbon grafit je heterogenní materiál s příměsí živice (bitumenu) Gilsonitu. Příklad k betonu se tedy přímo nabízí (pojivo + kamenivo).

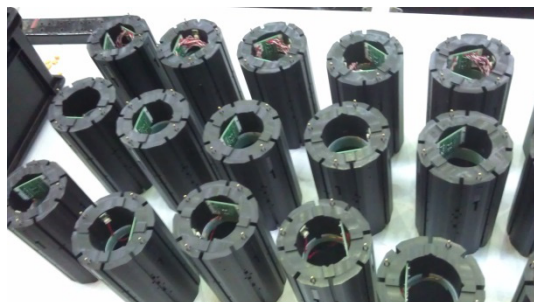


Obr. 1: Schéma reaktoru jaderné elektrárny typu AGR (převzato z [8]), pod odkazem s číslem 3 se nalézá grafitový moderátor (ostatní odkazy, viz [8], nejsou pro tento článek relevantní)

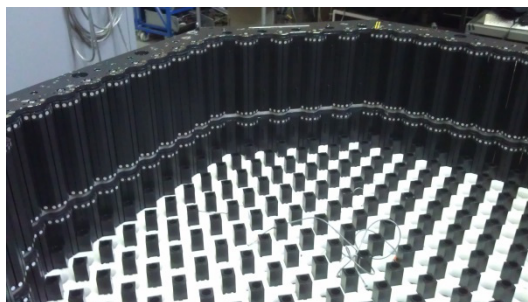


Obr. 2: Vzorek kvazikřehkého Gilsocarbon grafitu (převzato ze [9])

Novátorský typ testu Gilsocarbon grafitu byl navržen v [9]. Jedná se o biaxiální ohyb tělesa ve tvaru kříže, tělesa mohou být opatřena koncentrátorem napětí v průsečíku ramen tělesa. Vyhodnocení zkoušky však postrádá lomový přístup. Nastíněný problém otevírá cesty pro velice zajímavý a aktuální výzkum kvazikřehkého Gilsocarbon grafitu pomocí biaxiální zkušební konfigurace v době, kdy UK bilancuje životnost svých jaderných zařízení.



Obr. 3: Modely bloků z Gilsocarbon grafitu vkládaných do reaktoru používané na University of Bristol pro posouzení odolnosti reaktoru na zemětřesení (foto © Veselý 2014)



Obr. 4: Model dna AGR reaktoru používaný na University of Bristol pro posouzení odolnosti reaktoru na zemětřesení (foto © Veselý 2014)

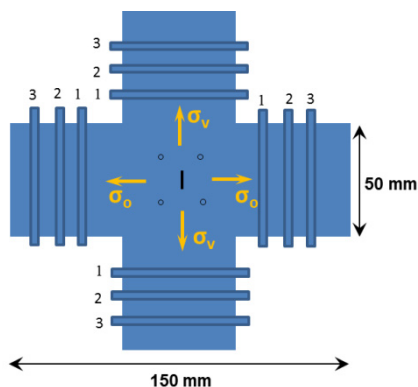
Príspevek se zaměřuje na pilotní studii ohybového testu na křížovém tělese za pomoci výpočetního nástroje na bázi kohezivní trhliny, umožňujícího simulaci prostorového lomového chování konstrukcí či jejich prvků. Ve studii jsou v úvahu brány různé aspekty modelu i vlastní zkoušky: vstupní materiálové charakteristiky dostupné z literatury i referenčních testů; možnosti snímání odezvy konstrukce na její zatížení; vliv tvaru tělesa (např. vliv otvorů po upevňovacích šroubech pro snímání otevření trhliny) apod. Numerický model umožní odhadnout správná místa pro tenzometrická měření a usnadnit následnou lomovou analýzu. Snímání akustické emise (AE) během experimentů by mohlo, díky lokalizaci AE událostí, poskytnout ověření výpočtového modelu – včetně vlivu okrajových podmínek, kterými je řízen biaxiální stav napětí zkušebního tělesa [10].

2 NUMERICKÝ MODEL KŘÍŽOVÉHO TĚLESA

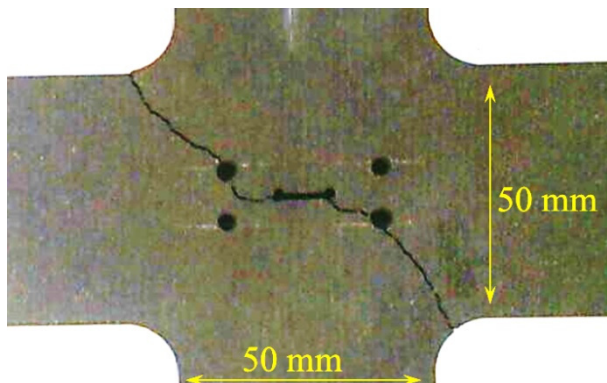
Z dostupné geometrie (ukázka na Obr. 5) byl vytvořen výpočtový model, věrně kopírující rozměry zkušebního tělesa, použitého při experimentu provedeného ve VB (University of Bristol). Rozvržení podpor má zásadní vliv na úroveň biaxility – působením zatížení (během experimentu vyvolané přírůstkem posunu příčnicku, přeneseným ze zkušební lisu do zkušební vzorku přes sférické těleso) se jedná o konfiguraci pětibodového ohybu zkušebního tělesa. Posunutím podpor v určitém směru (Obr. 5) má za následek změnu biaxiální napjatosti za využití pouze jedné testovací geometrie (výhoda sériové výroby těles např. pro pozdější citlivostní analýzu). Zkušební těleso je opatřeno koncentrátorem napětí ze své spodní strany – mělkým zářezem – ve volitelném úhlu oproti centrální rovině tělesa (změna rozložení napětí a jiný princip porušení). Nevýhodou této zkoušky ve variantě, jak byla provedena a publikována v [9], jsou však celkem čtyři vyvrtané díry pro šrouby (Obr. 6), které při experimentu „nesou“ břity, na kterých se, pomocí svérkových měřidel, měří tzv. otevření ústí trhliny (*CMOD* – Crack Mouth Opening Displacement) v závislosti na zatěžovací síle zkušebního zařízení. Jak bylo zmíněno, tyto otvory ovlivňují směr šířící se trhliny, jež inklinuje k dalším koncentrátorům napětí v narušené struktuře grafitového ligamentu. Důsledky takto vzniklého problému se (posléze) bude snažit nakonfigurovaný numerický model kvantifikovat pro vyhodnocení testu či navrhnout snížení tohoto efektu. Materiálové charakteristiky Gilsocarbon grafitu se v literatuře [5, 6, 9] různí, avšak jistá shoda byla nalezena: Youngův modul pružnosti

$E = 10,9 \text{ GPa}$, Poissonův součinitel $\nu = 0,2$; jednoosá tlaková pevnost $f_c = 28 \text{ MPa}$, jednoosá tahová pevnost $f_t = 2,32 \text{ MPa}$ a lomová energie $G_f = 260 \text{ Jm}^{-2}$.

Numerické modely křížového tělesa (Obr. 7a), klíčové pro všechny naplánované analýzy a srovnání, jsou vytvořeny ve výpočetním nástroji ATENA 3D [11], kterým je možno modelovat porušení konstrukcí trhlinami, jejich vznik a postupné šíření v průběhu zatěžovacího procesu. Disponuje nelineárními modely materiálů (plasticita, porušování) pro simulaci jeho reálného porušení. Lomově-plastický model pro beton (*3D Nonlinear Cementitious 2*), který byl použit i pro simulaci kvazikřehkého Gilsocarbon grafitu, kombinuje konstitutivní modely pro tahové (lomové) a tlakové (plastické) chování [12]. Samotný model lomu je založen na klasické ortotropní formulaci rozetřených trhlin s implementací modelu pásu trhlin (model kohezivní trhliny).

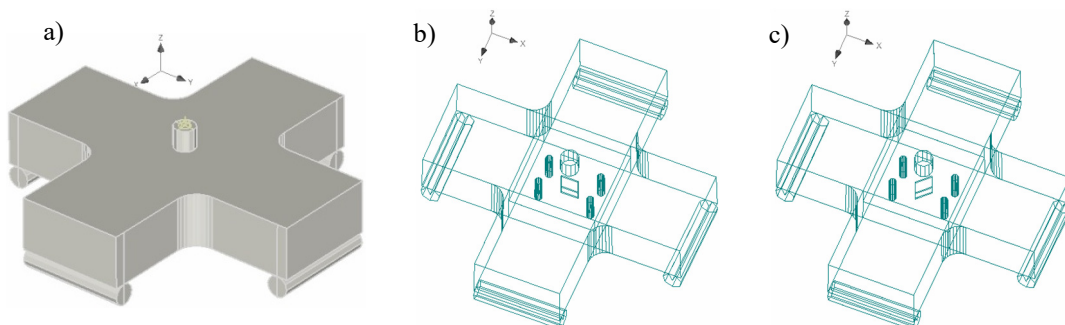


Obr. 5: Ukázka geometrie zkušebního tělesa v pětibodovém ohybu, vyvolávající výrazné biaxiální stav napětí (převzato z [9])



Obr. 6: Porušení křížového tělesa z kvazikřehkého Gilsocarbon grafitu (převzato z [9])

Parametry zachycené odezvy zkušebního zařízení během reálného experimentu jsou zatím dvojího typu (síla a CMOD). V tomto duchu se úsilí autorů zaměřilo na verifikaci v rámci umístění monitorovacích bodů. Během simulace byl navíc zaznamenáván průhyb ve spodní části numerického modelu a reakce na přírůstek deformace zatěžovací hlavy. Sítí konečných prvků byla věnována zvýšená pozornost zejména v místech přechodu dvou přilehlých ramen tělesa. Jedna z variant výpočtového modelu byla generována z prvků ve tvary šestistěnů (tzv. bricky), přičemž všechny další varianty již byly generovány z prvků ve tvaru čtyřstěnů (tzv. tetrahedrony).



Obr. 7: Numerický model křížového tělesa pro biaxiální ohybový test, a) s detailem podpor, b) varianta s odklonem směru trhliny o 0° a otvory pro šrouby, c) varianta s odklonem směru trhliny o 45° a otvory pro šrouby

Hloubka zářezů (respektive délka trhliny) byla zvolena v pěti hodnotách (6, 8, 10, 14 a 18 mm). Úhel směru trhliny zaujímal dvě pozice – odklon o 0° a odklon o 45° oproti střednicové rovině dvou hlavních ramen tělesa, jako je tomu naznačeno na Obr. 7b a 7c. Varianty (viz dále, v legendě označované jako ŠROUBY) využívající šrouby byly uvažovány ve dvou alternativách: tření oceli o grafit (součinitel tření $\mu = 0,1$ pro grafit s ocelí) nebo pevný kontakt obou povrchů. Přičemž šroub byl modelován elastickým isotropním materiálovým modelem, dostupným v knihovně nástroje ATENA 3D, modelujícím ocel o $E_s = 210$ GPa a $\nu = 0,3$. Rozpětí podpor činí 140 mm pro oba směry – tedy jedna varianta představující equibiaxiální konfiguraci.

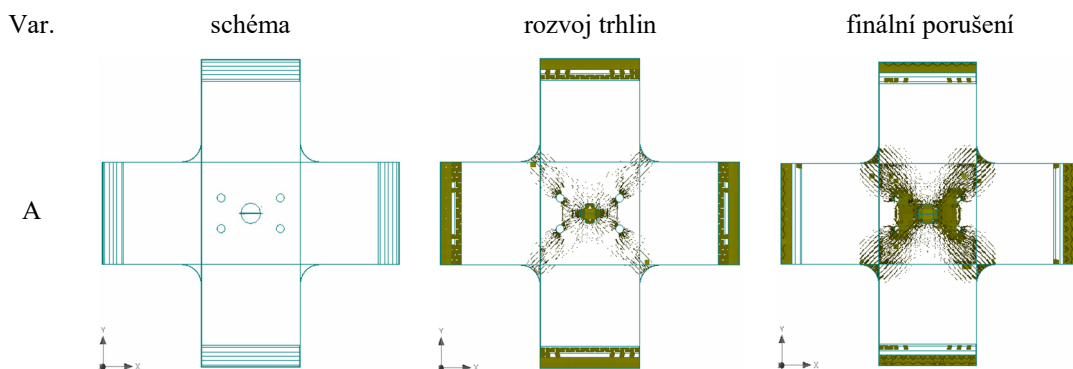
3 DISKUZE VÝSLEDKŮ

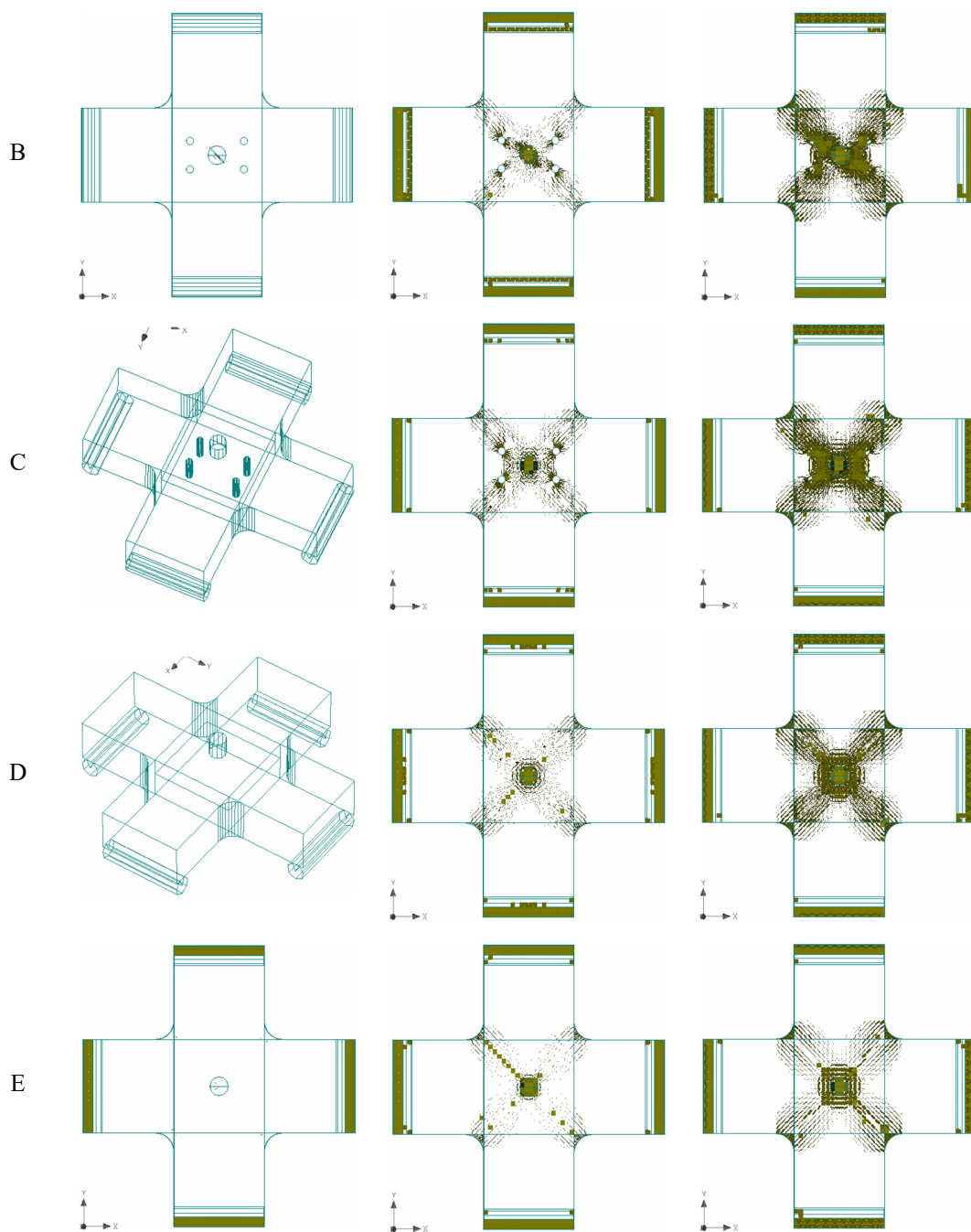
3.1 Srovnání z hlediska rozvoje trhlin

Jednotlivé varianty numerických modelů křížového zkušební tělesa jsou shrnuty v Obr. 8, kde konfigurace A označuje zkušební těleso opatřené otvory pro šrouby s iniciačním zářezem délky 10 mm (relativní hloubka odpovídající 0,4) s úhlem odklonu směru trhliny od střednicové roviny 0° (Obr. 7b). Varianta B je podobná, avšak úhel odklonu zaujímá hodnotu 45° (Obr. 7c). Varianta C neobsahuje iniciační zářez. Varianta D a E pak není porušena otvory pro šrouby a rozdíl je jen v síti konečných prvků (kouty tělesa a spodní kvádr u varianty D jsou modelovány tetrahedrony a ostatní varianty bricky).

Prostřední sloupec Obr. 8 ukazuje způsob vzniku a šíření porušení v počátečních stádiích zkoušky, zato pravá část zobrazuje stupeň porušení na konci nasimulované zatěžovací křivky (viz Obr. 9). Je patrné, že iniciační trhlina (zářez) má nemalý vliv na směr šířící se trhliny. Varianta A s iniciačním zářezem rovnoběžným s osou x vykazuje vznik mikrotrhlin (šíření lomové procesní zóny – LPZ) v rozích zářezu a trhlina má tendenci postupovat ve směru osy x až do okamžiku, kdy je porušení odkloněno do koutů křížového tělesa (přes otvory pro uchycení břitů). Zato varianta B vykazuje trend šířící se trhliny v požadovaném směru sklonu 45° . Ve variantách C až E se sice trhlina šíří uprostřed tělesa, ale nemají předem daný směr. Postupně se propagují do koutů zkušební tělesa.

Jak již bylo zmíněno, otvory pro upevňovací šrouby fungují jako koncentrátoři napětí (parazitní porušení), což lze zaznamenat u vzoru trhlin při srovnání varianty A s B. Odklon iniciačního zářezu o 45° způsobuje směřování šíření trhliny přímo do koutů mezi rameny zkušební tělesa. Ve skutečnosti je velká část energie potřebná k šíření trhlin iniciovaných v otvorech pro upevňovací šrouby. Srovnání varianty s otvory pro šrouby (C) a bez nich (D, E) ukazuje na snadnější šíření trhliny v prospěch variant C, což by ve vyhodnocení testu vedlo k nižší získané hodnotě lomové energie (hodnocené ze zatěžovacího diagramu) v rámci stejných materiálových charakteristik. Avšak šíření trhliny bez odklonů přímo do rohů tělesa je typické pro varianty D a E.

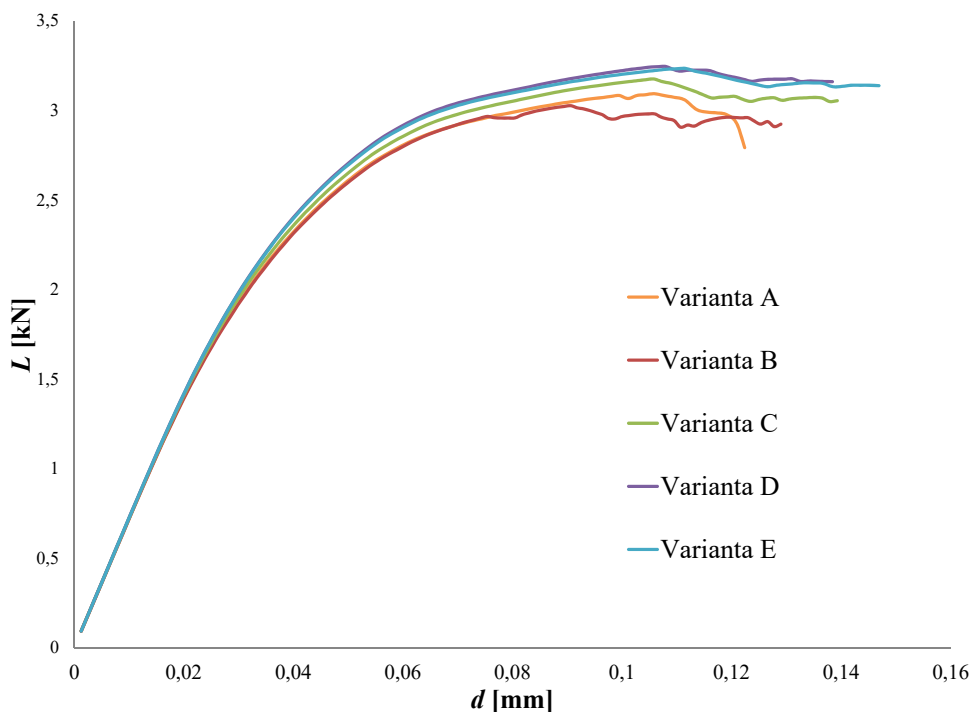




Obr. 8: Jednotlivé analyzované varianty křížového testu včetně vzoru trhlin

3.2 Srovnání z hlediska zatěžovacích křivek

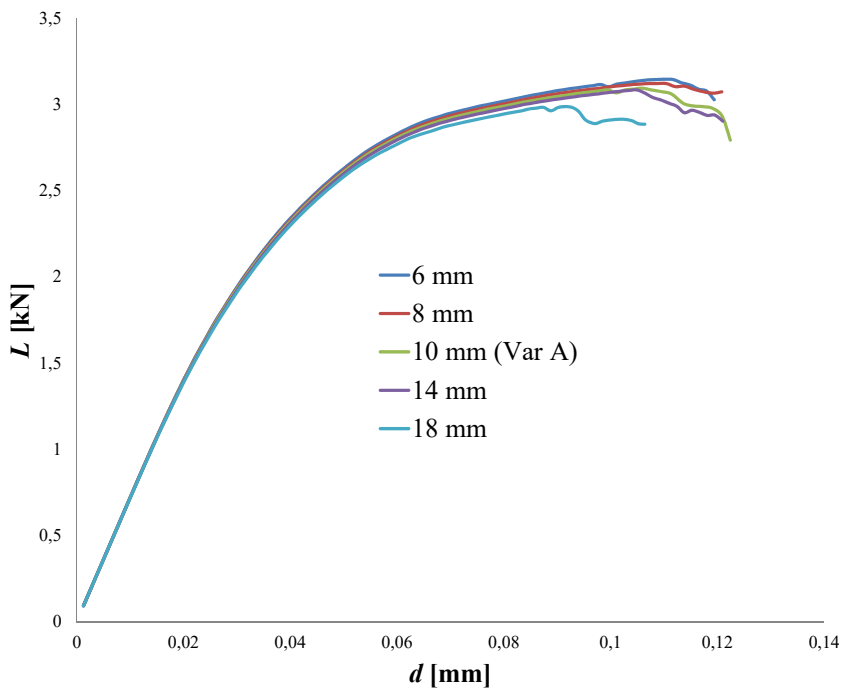
Z Obr. 8 jsou známy zkušební varianty křížového tělesa a jejich zatěžovací křivky (load-deflection diagramy) shrnuje Obr. 9. Liší se od sebe především v koncové části křivek, kdy se naplno projevuje šíření trhlin. To lze prakticky ukázat na příkladu varianty B, která má průběh s nejnižší hodnotou přenesené síly při porušení křížového zkušební tělesa. Je to dáno šikmým umístěním iniciačního zářezu, který svou rovinou míří do koutů mezi rameny tělesa. Srovnání křivek pro varianty C až E jen potvrzuje komentář z předchozí kapitoly.



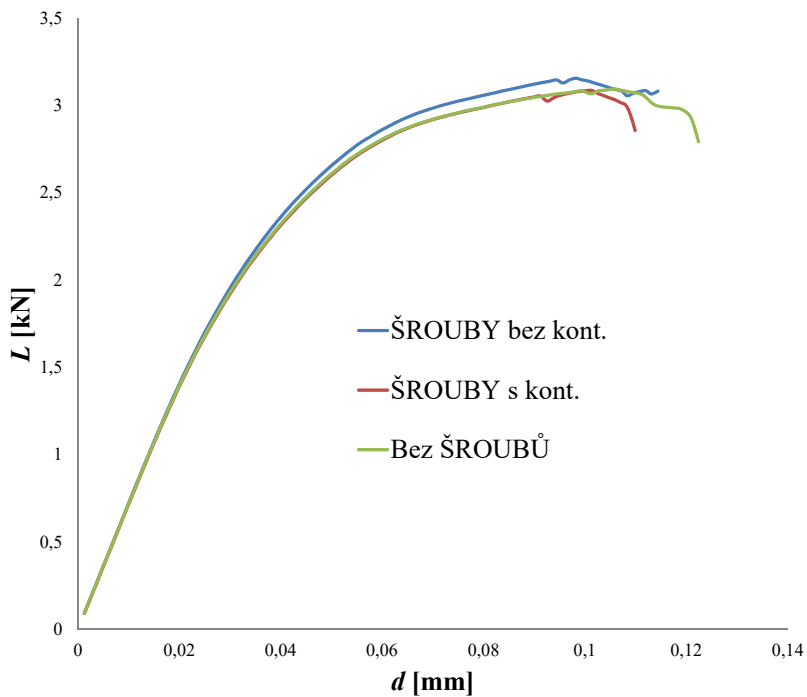
Obr. 9: Zatěžovací diagram vybraných variant numerických modelů křížového tělesa

Vliv délky iniciačního zářezu na průběh zatěžovacích diagramů (pro variantu A) ukazuje Obr. 10, kde je splněna logika pro výpočtový model ve smyslu splnění předpokladu, že větší délka trhliny vede k rychlejšímu (snadnějšímu) kolapsu zkušební tělesa.

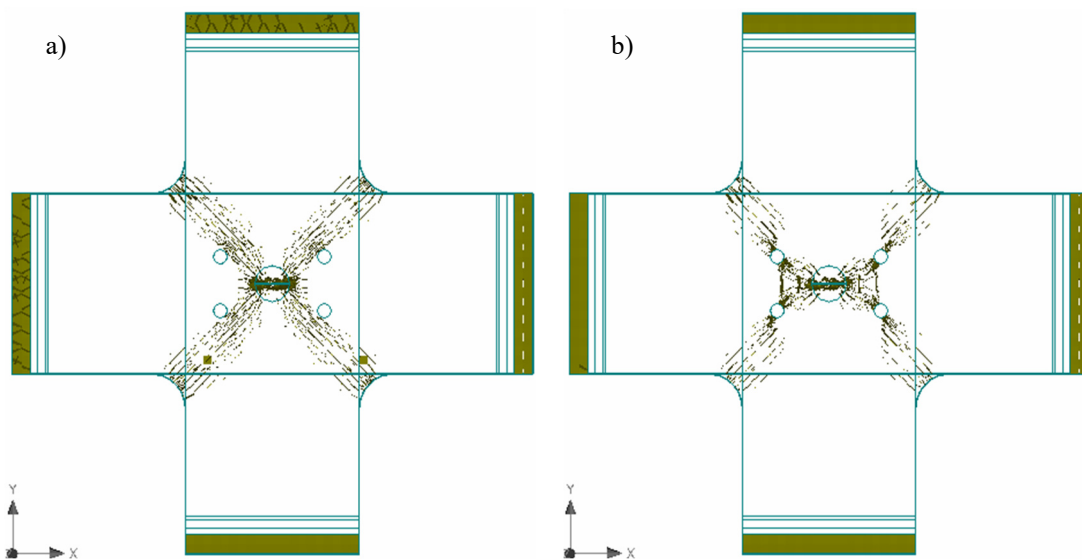
Zajímavější pohled na problematiku ohybu křížového zkušební tělesa ilustruje Obr. 11. Jsou zde srovnány tři varianty zatěžovacích diagramů varianty A, kde je zkoumán vliv výplně otvorů homogenním materiálem, suplujícím montážní šrouby. Respektive variantu, kde jsou otvory ponechány bez výplně, jako je tomu u předchozích variant z Obr. 9. Křivka pro použití šroubů bez kontaktu oceli s grafitem (modrá) vyznačuje pevné spojení v rámci výpočtového modelu a znamená odklon od dvou zbývajících variant. Zato použití šroubů s kontaktem či žádné výplně vykazuje malé změny v trendu (pokud se odmyslí koncová část). Obr. 12 představuje vzor trhlin pro variantu *ŠROUBY bez kont.* a *ŠROUBY s kont.* Vzájemné srovnání ukazuje šíření trhliny (ve prospěch varianty bez kontaktních prvků) směrem do kouta tělesa, aniž by přecházela přes otvory pro šrouby. Na druhé straně při použití kontaktních prvků je zaznamenáno šíření přes plochu (povrch) otvorů pro šrouby.



Obr. 10: Zatěžovací diagramy pro modely s různými délkami iniciačního zářezu pro variantu A numerického modelu křížového tělesa



Obr. 11: Zatěžovací diagramy ilustrující vliv použití výplně otvorů pro iniciační šrouby u varianty A numerického modelu křížového tělesa



Obr. 12: Vzory trhlin varianty A numerického modelu křížového tělesa z Obr. 11 ilustrující vliv použití výplně otvorů pro iniciační šrouby, a) bez kontaktních prvků, b) s kontaktními prvky

4 ZÁVĚR

Článek představil analýzu vlivu různých aspektů numerického modelu křížového tělesa určeného pro ohybový biaxiální zkušební test, jenž byl použit pro výzkum porušování Gilsocarbon grafitu. Ze zjištěných výsledků je zřejmé, že podrobnější analýza ohybového testu křížového tělesa byla zcela na místě. Úspěšná implementace výpočtového modelu ukázala na problematické aspekty navržené zkoušky, jež by měly být eliminovány či zohledněny při jejím vyhodnocení. Vhodná délka a především odklon iniciačního zářezu tělesa s uvažováním výplně otvorů pro montážní šrouby se ukazují jako stěžejní. Pro reálné testování by se měl najít jiný vhodný způsob měření deformace ve spodní části zkušebního tělesa s ohledem na koncentrátoři napětí (respektive iniciátory trhlin).

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum byl realizován za finanční podpory VUT v Brně (projekt juniorského specifického vysokoškolského výzkumu FAST-J-15-2727).

LITERATURA

- [1] RILEM Technical Committee 50-FMC. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams. *Materials and Structures*. 1985, Vol. 18, Issue. 4, pp. 285–290.
- [2] LINSBAUER, H. N. & TSCHEGG E. K. Fracture energy determination of concrete with cube-shaped specimens. *Zement und Beton*. 1986, Nr. 31, pp. 38–40.
- [3] TSCHEGG, E. K., SCHNEEMAYER, A., MERTA, I. & RIEDER K.-A. Energy dissipation capacity of fibre reinforced concrete under biaxial tension–compression load. Part I: Test equipment and work of fracture. *Cement and Concrete Composites*. 2015, 62, pp. 195–203.
- [4] VESELÝ, V. & SOBEK J. Numerical study of failure of cementitious composite specimens in modified compact tension fracture test. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. Vol. 13, Issue 2, pp. 209–216. ISSN (Print) 1213-1962. ISSN (Online)1804-4824. DOI: 10.2478/tvsb-2013-0025, 2013.

- [5] MOSTAFAVI, M., MCDONALD, S. A., ÇETINEL, H., MUMMERY P. M. & MARROW T. J. Flexural strength and defect behaviour of polygranular graphite under different states of stress. *Carbon*. 2013, Nr. 59, pp. 325–336.
- [6] LAUDONE, M. G., GRIBBLE, M. CH. & MATTHEWS G. P. Characterisation of the porous structure of Gilsocarbon graphite using pycnometry, cyclic porosimetry and void-network modeling. *Carbon*. 2014, Nr. 73, pp. 61–70.
- [7] WERNER, A. G. Ueber das Vorkommen des Basalates auf Kuppen vorzueglich hoher Berge. *Bergmännisches Journal*. 1789, Nr. 2, pp. 252–260.
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_gas-cooled_reactor.
- [9] LIU, D., MOSTAFAVI, M., FLEWITT, P. E. J., MARROW, T. J. & SMITH D. Fracture characterisation of reactor core graphite under biaxial loading. *Key Engineering Materials*. 2014, Nr. 577–578, pp. 485–488.
- [10] VESELÝ, V., FRANTÍK, P., VODÁK, O. & KERŠNER Z. Localization of propagation of failure in concrete specimens assessed by means of acoustic and electromagnetic emission and numerical simulations. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. Vol. 11, Issue 2, pp. 269–278. ISSN (Print) 1213-1962. ISSN (Online)1804-4824. DOI: 10.2478/v10160-011-0036-5, 2011.
- [11] ČERVENKA V., JENDELE, L. & ČERVENKA J. *ATENA Program documentation – Part 1: Theory*. Praha: Červenka Consulting, 2007.
- [12] HOLUŠOVÁ, T., SEITL, S. & FERNÁNDEZ-CANTELI A. Numerical support of experimental compact tension test on concrete cylindrical specimens. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. Vol. 13, Issue 2, pp. 119–128. ISSN (Print) 1213-1962. ISSN (Online)1804-4824. DOI: 10.2478/tvsb-2013-0007, 2013.

Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Zdeněk Majer, Ph.D., ÚMTMB - odbor lomové mechaniky a mesomechaniky materiálů, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně.

Eng. Maciej Major, PhD., Katedra Mechaniki Technicznej, Wydział Budownictwa, Politechnika Częstochowska, Poland.