

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Stavebná fakulta

Meno a priezvisko:

Ing. Matúš Turis

Autoreferát dizertačnej práce:

Príspevok k riešeniu problémov lomovej mechaniky

na získanie akademického titulu:	philosophiae doctor – PhD.
v doktorandskom študijnom programe:	aplikovaná mechanika
v študijnom odbore:	strojárstvo
forma štúdia:	denná

Miesto a dátum:

Bratislava, 31.05.2021



Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedre stavebnej mechaniky, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladatel':	Ing. Matúš Turis
	Katedra stavebnej mechaniky
	Stavebná fakulta, STU v Bratislave
	Radlinského 11, 810 05 Bratislava
Školiteľ:	doc. Ing. Oľga Ivánková, PhD.
	Katedra stavebnej mechaniky
	Stavebná fakulta, STU v Bratislave
	Radlinského 11, 810 05 Bratislava
Oponenti:	prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
	Ústav stavební mechaniky
	Fakulta stavební, VUT v Brne
	Veveří 331/95, 602 00 Brno
	Ing. Lucie Malíková, Ph.D.
	Ústav stavební mechaniky
	Fakulta stavební, VUT v Brne
	Veveří 331/95, 602 00 Brno
	Dr.h.c. prof. Ing. Milan Žmindák, CSc.
	Katedra aplikovanej mechaniky
	Strojnícka fakulta, UNIZA v Žiline
	Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný dňa: . .2021

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 25.8.2020 o 09:00 h online cez Google Meet (SvF, STU v BA), Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD. Dekan fakulty

Abstrakt

Dizertačná práca sa venuje problematike lomovej mechaniky z teoretického, numerického a experimentálneho pohľadu. Popísaná je história a súčasný stav lomovej mechaniky, načo nadväzujú základné teoretické princípy v tejto oblasti. Odskúšaná metodika numerických simulácií na prípadoch so známym riešením úloh je ďalej rozšírená na zložitejšie problémy. Experimentálne a numericky bol stanovený *dynamický koeficient intenzity napätia (DSIF)*. Experiment bol realizovaný pomocou optickej metódy, založenej na zaznamenávaní intenzity svetla, ktoré prechádza cez trhlinu. Počas celého procesu súčasne prebiehala numerická simulácia problému pomocou metódy konečných prvkov v prostredí ANSYS Workbench, ktorá pomohla pri výbere vzoriek, prvotnom nastavení meracej zostavy a najmä pri verifikácií získaných výsledkov. Po vzájomnom overení numerického a experimentálneho riešenia bola urobená parametrizácia vybraných úloh lomovej mechaniky.

Obsah

1	Úvod	.3
2	Ciele práce	.4
3	Súčasný stav problematiky	.4
4	Riešenie úloh v oblasti platnosti lineárne elastickej lomovej mechaniky (<i>LEFM</i>)	.6
5	Experimentálne merania dynamického koeficientu intenzity napätia (DSIF)	.8
6	Záver	15
7	Použitá literatúra	17
8	Zoznam vybraných publikovaných prác autora	18

1 Úvod

Problémy lomovej mechaniky sú aktuálnou témou v oblasti vedného odboru mechaniky tuhých telies. Lomová mechanika sa zaoberá stabilitou a šírením trhlín a ich vplyvom na skúmané teleso.

V rámci teoretickej časti práce sú vysvetlené základné princípy lomovej mechaniky a poukázané je na niektoré aplikácie v analytických úlohách. Uvedené sú

pojmy v lineárne elastickej, pružno-plastickej a elasto-dynamickej lomovej mechanike.

Časť práce tvoria vlastné experimentálne merania dynamického koeficientu intenzity napätia. Navrhnutá je metodika optickej difrakčnej metódy na monitorovanie dynamických pohybov trhliny, vyvolaných impulzným zaťažením. Jedná sa optickú metódu založenú na princípe difrakcie svetla za úzkou štrbinou, vymedzujúcou dve paralelné tváre trhliny. Táto metóda je relatívne nenáročná na technické vybavenie a ako bude poukázané, poskytuje stabilné výsledky v stanovení dynamických pohybov trhliny. Výsledky experimentu sú konfrontované s výsledkami numerickej simulácie problému a je vykonaná experimentálno-numerická parametrizácia polohy impulznej sily a geometrie analyzovaných vzoriek.

2 Ciele práce

Ciele práce možno zhrnúť do nasledovných bodov:

- Poukázanie na dôležitosť princípov lomovej mechaniky ako súčasti mechaniky tuhých telies
- Získanie a overenie teoretických znalostí v oblasti lomovej mechaniky
- Vyhodnotenie aplikovateľnosti jednotlivých prístupov na riešenie úloh lomovej mechaniky
- Stanovenie koeficientu intenzity napätia za statických a dynamických podmienok zaťažovania
- Porovnanie analytických a numerických riešení poškodených telies pre 2D a 3D úlohy
- Stanovenie tvaru plastickej v blízkom okolí koreňa trhliny pri čistom a zmiešanom móde namáhania trhliny
- Experimentálne meranie dynamického koeficientu intenzity napätia v zmiešanom móde zaťažovania trhliny
- Porovnanie experimentálne získaných výsledkov s riešením pomocou metódy konečných prvkov
- Vytvorenie metodiky pre nedeštruktívne experimentálne stanovenie kondície poškodeného konštrukčného prvku
- Parametrizácia úloh lomovej mechaniky

3 Súčasný stav problematiky

Lomová mechanika je samostatnou časťou mechaniky tuhých telies. V súčasnosti existuje mnoho publikácií, venujúcich sa prehlbovaniu teoretických poznatkov, rozširovaniu možností numerických metód alebo zdokonaľovaniu experimentálnych meraní. V nasledujúcej časti, popisujúcej súčasný stav problematiky, bude spomenutá časť prác, venujúca sa aktuálnym poznatkom lomovej mechaniky. Keďže existuje množstvo dostupnej literatúry, snaha bola popísať širší záber poznatkov v tejto oblasti.

Podmienkam nestabilného rastu trhliny, vystavenému statickému aj cyklickému zaťaženiu pre trojrozmernú úlohu v zmiešanom móde zaťaženia sa venujú v literatúre [1]. Priestorovým problémom sa zaoberajú napríklad v literatúre [2], kde je pozornosť upriamená na zaťažovací mód *III* a skúmanie jeho vplyvu na vyvolanie účinkov v zaťažovacom móde *II*.

Smery šírenia únavových povrchových a okrajových trhlín na základe optimalizovaných pravdepodobnostných simulácií rozoberajú v literatúre [3]. Optimalizačným algoritmom na určenie smeru šírenia trhliny a jeho vplyv na potenciálne zlyhanie konštrukčného prvku, sa venujú aj v literatúre [4]. Za použitia metódy hraničných elementov je určená propagácia trhliny pri zmiešanom móde namáhania v [5], pričom okrajové podmienky boli dané trením telies pod tlakom s využitím iteračných krokov. Vyhodnotenie lomových testov na kvázi-krehkých vzorkách vystavených trojbodovému ohybu s využitím vlastného algoritmu je v [6].

Stanovenie koeficientu intenzity napätia pomocou 2D a 3D numerickej analýzy pre rohovú trhlinu, umiestnenú na uzavretom oceľovom profile, je v [7]. Porovnaný je tu vplyv pomeru dĺžok trhliny na hornej a bočnej stene profilu. Diskrétny mechanizmus poškodenia (*DDM*) pre iniciáciu priečneho a šmykového porušenia pre kompozitné materiály je predstavený v [8]. Pre kompozit, ktorý obsahuje ostrú hranu na kontakte dvoch materiálov, určovali podmienky iniciácie lomu pomocou tangenciálnych napätí v [9].

Experimentom austentických a vysokopevnostných ocelí, taktiež aj hliníkovo-lítiovým zliatinám, ktoré sú schopné podliehať krehkému lomu, sa venujú v [10]. Dvojrozmernej analýze *rozovretia koreňa trhliny (CTOD)* v elasticko-plastickom materiáli a šíreniu trhlín pri cyklickom namáhaní sa venujú v [11].

Stanoveniu parametra *J-integrálu*, ako funkcie rastu trhliny a určenie lomových húževnatostí pre rozdielne typy ocelí, sa venujú v [12]. Štádiá trhliny za použitia mikroskopu pre teleso, namáhané cyklickým zaťažením, sú skúmané v [13]. Ďalšie experimentálne merania na stanovenie lomovej húževnatosti lepených spojov pomocou optických metód je v [14].

Vplyvu veľkosti trhliny, módu zaťaženia a materiálových vlastností na lomovú húževnatosť za použitia dvojparametrických modelov pre duktílne materiály je venovaná literatúra [15]. Uzavretým kruhovým profilom, vystaveným vnútornému tlaku obsahujúcich trhlinu pomocou numerických a experimentálnych metód, sa venujú v [16], kde kritické hodnoty húževnatosti boli získané Charpyho testom.

Stanoveniu lomovej húževnatosti pri impulznom zaťažení za uváženia pružno-plastického materiálu sa venujú v [17]. Výpočet miery akumulácie poškodenia a závislosť medzi vlastnými frekvenciami a dĺžkou trhliny je v [18]. Analytickému riešeniu *CTOD* pri zaťažení, ktoré sa mení v čase, sa venujú v [19]. Stanovením *koeficientu intenzity napätia* pre tri paralelné trhliny v nekonečnej platni, zaťaženej harmonickým zaťažením, sa zaoberajú v [20].

Samozrejme existuje veľké množstvo zaujímavej literatúry, kde sú podrobne popísané princípy, postupy a odporúčania na numerické modelovanie alebo experimentálne merania. Vo všeobecnosti možno poznamenať, že poznatky lomovej mechaniky aktívne využívajú takmer všetky odvetvia vývoja a výskumu, ale aj priemyslu, či inžinierskych profesií.

4 Riešenie úloh v oblasti platnosti lineárne elastickej lomovej mechaniky (*LEFM*)

Riešenie koeficientu intenzity napätia (SIF)

Hodnotu *SIF* možno vyjadriť priamo z definície pomocou extrapolácie pre r = 0. Uvedené sú dve extrapolačné metódy pre určenie *SIF*: extrapolačná metóda premiestnení (*DEM*) a extrapolačná metóda posunutých uzlov (*NDEM*). Takéto riešenie je vo veľkom množstve dostupnej literatúry, napríklad [21-24]. Na Obr. 4.1 je zobrazená geometria trhliny a počiatok súradného systému potrebný pre extrapolačné metódy.



Obr. 4.1 (a) Polárne súradnice pre SEM a DEM, (b) Uzly potrebné pre NDEM.

V prípade extrapolačnej metódy premiestnení *DEM* možno vychádzať z posunutia bodov pred koreňom trhliny. Tieto vzťahy sú rozdielne pre stav rovinnej napätosti a rovinnej deformácie. Efektívne riešenie je možné pre orientovaný uhol $\theta = \pm \pi$. Pomocou metódy posunutých uzlov *NDEM* možno stanoviť *SIF* pomocou prvého radu rotačne usporiadaných singulárnych elementov. Geometria takéhoto usporiadania elementov je na Obr. 4.1 (b). Software ANSYS má zabudovaný výpočet *SIF* pomocou metódy interakčného integrálu podľa [25].

Riešenie trojrozmernej úlohy v zmiešanom móde namáhania trhliny

Uvedeným príkladom je nosník s prierezom v tvare písmena *L*, namáhaný v zmiešanom móde *I/ II/ III*. Zvolený nosník s dĺžkou L = 200 mm, šírkou stien W = 20 mm, hrúbkou steny B = 1.5mm a pomerom a/W = 0.25 je na Obr. 4.2. Nosník je na jednej strane prichytený párom skrutiek, ktoré majú zadefinované votknutie plochy z vonkajšej strany (*ex*) a kontakt medzi skrutkami a nosníkom bol zadefinovaný ako

lineárny *no-separation*. Druhá strana je zaťažená silou so zložkami v troch smeroch globálneho súradného systému. Uvedené výsledky sú pre silu v smere pozdĺžnej osi x s hodnotou 1.5 kN a sily v smeroch *y*, *z* sú rovné $F_x/10$.



Obr. 4.2 Geometria nosníka s prierezom v tvare písmena L namáhaného vo všetkých troch módoch súčasne

Prístupmi lineárne elastickej lomovej mechaniky boli stanovené jednotlivé *SIF* po hrúbke telesa s využitím interakčného integrálu a metódy posunutých uzlov (*NDEM*). Výsledky týchto prístupov boli prakticky totožné, s relatívnou chybou pod 1%. Hodnoty jednotlivých *SIF* sú zobrazené na Obr. 4.3.



Obr. 4.3 Hodnoty SIF po hrúbke nosníka, negatívne B znamená vonkajšiu stranu profilu (ex)

Trojrozmerné ohraničenie medze klzu pre hranu trhliny, umiestnenú na hornej stene profilu, je zobrazené na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Ohraničenie medze klzu v okolí hrany trhliny umiestnenej na hornej stene profilu (mm)

Za materiál nosníka bol zvolený hliník s E = 71 GPa, v = 0.33 a medzou klzu $\sigma_{ys} = 215$ MPa. Pružno-plastické správanie materiálu bolo vystihnuté Ramberg-Osgoodovym modelom s koeficientom spevnenia n = 50 [26].

5 Experimentálne merania dynamického koeficientu intenzity napätia (*DSIF*)

V tejto kapitole je opísaná metodika a výsledky experimentálnych meraní dynamického koeficientu intenzity napätia *DSIF*. Šíriace sa napäťové vlny môžu navzájom interferovať a spôsobovať tak interferenčné zosilnenie alebo utlmenie.

Cieľom analýzy bola validácia metodiky merania dynamických pohybov tvárí vrubu imitujúceho trhlinu. Porovnanie výsledkov numerickej simulácie a experimentálneho merania je často ovplyvnené náročnosťou vystihnutia okrajových podmienok uloženia. Špeciálne v prípade dynamického zaťaženia faktory ako trenie v podperách, strata kontaktu s podporným elementom, tuhosť kontaktu medzi vzorkou a podperou alebo vibrácie podpornej konštrukcie, majú zásadný vplyv na dosiahnuté výsledky. Tieto riešenia vedú k použitiu prídavných algoritmov na získanie často nelineárneho kontaktu medzi meranou vzorkou a podpernou konštrukciou. V snahe eliminovať tento problém boli zvolené podpery z gumy, ktorých vlastná frekvencia bola rádovo nižšia ako vlastné frekvencie pohybov tvárí vrubu imitujúceho trhlinu. Z uvedeného vyplýva, že efekt podporných okrajových podmienok mohol byť v tomto prípade v numerickej analýze zanedbaný. Vylúčila sa tak potreba nastavovania numerického modelu na nájdenie zhody s meraniami. Validovanie experimentálneho merania prostredníctvom numerickej simulácie tak možno považovať za spoľahlivejšie.

Numerická príprava experimentu

Pred experimentálnym meraním prebiehala numerická príprava experimentu. Jedným z cieľom analýzy bolo overiť použiteľnosť *DEM*, resp. *NDEM* v prípade časovo-premenného zmiešaného módu namáhania trhliny *I/II/III*. Sila,

vypočítaná podľa Hertzovej téorie elastického nárazu [28, 29], bola v numerických simuláciách aplikovaná na rôzne geometrie a okrajové podmienky podopretia telesa s trhlinou, Obr. 5.1 (a-d). Účelom bolo overiť správanie sa poškodeného materiálu od vplyvu impulzného zaťaženia, vybrať adekvátnu numerickú metódu na stanovenie *DSIF* a zvoliť vhodnú geometriu a spôsob uloženia vzoriek pre experimentálne merania. Geometria a zaťaženie na uvedenom príklade, podľa Obr. 5.1 (d), je zvolená s ohľadom na zmiešaný mód namáhania *I/ II/ III*.



Obr. 5.1 Geometria a impulzné zaťaženie vzorky

Výsledné dynamické koeficienty intenzity napätia po hrúbke telesa a v čase sú graficky spracované na Obr. 5.2.



Obr. 5.2 Dynamické koeficienty intenzity napätia pre geometriu z Obr. 5.1(d)

Optická zostava pre experimentálne merania

Experimentálna optická metóda bola založená na difrakcií svetla za úzkou štrbinou. Laserový svetelný lúč prechádzal vytvorenou štrbinou prichytenou na protiľahlých stranách vrubu imitujúceho trhlinu. Za touto štrbinou vznikal difrakčný

obrazec, ktorý bol premietnutý na efektívnu plochu foto-diódového detektora a zaznamenaný na osciloskop. Po impulznom zaťažení telesa sa vplyvom šírenia napäťových vĺn začali tváre trhliny, a teda aj vymedzovacie hrany štrbiny, dynamicky pohybovať, čo sa prejavilo ako zmena zaznamenaného elektrického signálu. Schematicky je meracia zostava zobrazená na Obr. 5.3.



Obr. 5.3 Schéma meracej zostavy pre monitorovanie dynamických pohybov tvárí vrubu

Kalibrácia merania

Namerané hodnoty pohybov tvárí vrubu boli vo forme elektrického signálu vo voltoch, bolo teda potrebné stanoviť pomer V/m. Ako prvé sa zaznamenala intenzita svetla prechádzajúca cez štrbinu v pokoji a následne sa vzorka odobrala. Na rovnakú pozíciu bola umiestnená kalibračná štrbina s mikrometrickou skrutkou. Táto štrbina sa roztvorila na šírku tak, aby bol výstupný signál detektora rovnaký ako v prípade originálnej štrbiny v pokoji. Postupným otváraním a zatváraním kalibračnej štrbiny o malé hodnoty sa vytvoril graf foto-elektrického signálu vo voltoch a k nemu prislúchajúcej šírke štrbiny v metroch. Takto bolo možné priradiť konkrétnu hodnotu výstupného signálu k metrom. Konkrétny výsledok kalibrácie pre vzorku z Obr. 5.5 zaťaženú symetricky v strede rozpätia v čistom móde I je na Obr. 5.4. Z dôvodu nízkej tuhosti podpôr a ich nízkych frekvencií vzhľadom k frekvenciám vzorky, sa takýto prípad v literatúre označuje ako jedno bodový ohyb [30-33].



Obr. 5.4 Časovo závislé roztváranie vrubu, získané experimentálnym meraním a pomocou metódy konečných prvkov, pre $r = 6 \text{ mm } a \theta = 180^{\circ}$

Merania vzorky s okrajovým vrubom imitujúcim trhlinu

Na Obr. 5.5 je zobrazená geometria vzorky s okrajovým vrubom imitujúcim trhlinu: dĺžka vzorky L = 200 mm, W = 28.5 mm, B = 5 mm a pomer a/W = 0.5. Aby bol vyvolaný zmiešaný mód namáhania vrubu, zvolené bolo aj nesymetrické umiestnenie impulznej sily s hodnotami e = 20 - 50 mm s krokom po 10 mm.



Obr. 5.5 Geometria vzorky (mm), materiálové vlastnosti vzorky a impulzná sila vyvolaná nárazom guličky s D = 17.5 mm z výšky jeden meter

Frekvenčné spektrum vzorky s okrajovým vrubom imitujúcim trhlinu je zobrazené na Obr. 5.6.



Obr. 5.6 Frekvenčné spektrum pre vzorku s okrajovým vrubom



Vybrané výsledné DSIF sú graficky spracované na Obr. 5.7.

Obr. 5.7 Vybrané výsledné DSIF (MPa·mm0.5) pre vzorku s okrajovým vrubom, pokračovanie na ďalšej strane



Merania vzorky v tvare písmena L

Ďalším príkladom aplikácie experimentálneho postupu je meranie vzorky v tvare písmena L. Geometria vzorky je na Obr. 5.8. Jednalo sa o rovnoramenný uholník s dĺžkou strany L = 160 mm, šírkou W = 30 mm, hrúbkou B = 3 mm a pomerom a/W = 0.5, kde a je dĺžka vrubu imitujúceho trhlinu. Zvolené bolo pootočenie vrubu imitujúceho trhlinu od zvislej osi o uhol $\alpha = 45^{\circ}$.



Obr. 5.8 Geometria vzorky (mm), materiálové vlastnosti vzorky a impulzná sila vyvolaná nárazom guličky s D = 9.5 mm z výšky jeden meter

Frekvenčné spektrum je na Obr. 5.9. V časových záznamoch bolo možné identifikovať celkovo 8 vlastných frekvencií vzorky v tvare písmena L a jednu frekvencia podpernej gumy. Z meraní pre jednotlivé módy boli odčítané zhodne po štyri vlastné frekvencie.

• Mód I • Frekvencia (kHz) 0 5 10 15 20 25 30 35

Obr. 5.9 Frekvenčné spektrum vzorky v tvare písmena L

Výsledné porovnanie dosiahnutých výsledkov DSIF pre vzorku v tváre písmena L je na Obr. 5.10.



Obr. 5.10 Porovnanie nameraných a vypočítaných DSIF (MPa·mm^{0.5}) a vplyv zvoleného počtu krokov na dosiahnuté výsledky

Parametrizácia geometrie

Po verifikovaní metodiky experimentálno-numerickej analýzy sa pristúpilo k numerickej parametrickej štúdií vzorky v tvare písmena L. Geometria vrubu bola v tomto prípade zanedbaná a nahradená ostrou trhlinou. Parametrami bolo uhlové pootočenie trhliny a dĺžka trhliny, Obr. 5.8. Úloha bola riešená pre sedem uhlov $\alpha = 0$ až $\pi/2$ a sedem pomerov a/W = 0.1 až 0.9. Sledovanými veličinami boli prvé

dve nenulové frekvencie pre nepodopretú a votknutú vzorku. V prípade geometrie s pomerom a/W = 0.5 bola v závislosti od uhlu α vykonaná aj detailnejšia tranzientna analýza.

Globálny súradný systém bol zároveň lokálnym súradným systémom trhliny a zvyšná geometria sa posúvala o danú dĺžku trhliny a rotovala o uhol α , Obr. 5.11.



Obr. 5.11 Geometria vzorky so zobrazeným súradným systémom

Na aproximáciu funkcie (závislej od pomeru a/W a uhlu rotácie trhliny α) v medziľahlých bodoch priameho riešenia bola použitá prirodzená bikubická interpolácia [34]. Ako prvé možno uviesť priebeh prvej a druhej vlastnej frekvencie v závislosti od pomeru a/W a uhlu α , pre variant 1 a 2, Obr. 5.12. Na obrázku sú vyznačené hodnoty uhla α pri ktorom pre daný pomer a/W vyšla z analýzy minimálna a maximálna prvá a druhá vlastná frekvencia pre variant 1 a 2.



Obr. 5.12 Prvá a druhá vlastná frekvencia (kHz) závislá od pomeru a/W a uhlu a, vykreslenie kombinácie, pri ktorých sú frekvencie maximálne, resp. minimálne

Pre prípad geometrie s pomerom a/W = 0.5 bola v závislosti od uhlu α vykonaná detailnejšia tranzientna analýza. Výsledkami parametrickej transientnej analýzy boli maximálne hodnoty $K_l(t)$, $K_{tot}(t) = (K_l(t)^2 + K_{ll}(t)^2)^{0.5}$ a maximálne resp. minimálne hodnoty $K_{ll}(t)$. Ďalším výsledkom štúdie je integrál pod funkciou časovo závislého koeficientu intenzity napätia $\int_0^{T_j} K_l dt/T_j$, kde i = I, II a Tj symbolizuje prvú

vlastnú periódu uvažovaného uhlu $a_j = 0$; $\pi/6 \dots \pi/2$. Hodnota K_I (t) = max (K_I (t) ;0), keďže záporné hodnoty spôsobujú zatváranie trhliny. Výsledky analýzy sú na Obr. 5.13.



Obr. 5.13 Parametrická transientna analýza pre vzorku v tvare písmena L s pomerom a/W = 0.5.

6 Záver

Práca je venovaná problematike lomovej mechaniky. Zhrnutý je súčasný stav problematiky. Popísané sú príčiny lomového procesu a vplyv materiálových vlastností a okolitých podmienok na lomový proces. Opísaný je všeobecný lomový parameter a požiadavky, ktoré má spĺňať.

Uvedené sú teoretické základy lineárne elastickej lomovej mechaniky a vymedzená platnosť tohto prístupu, na základe energetických a napäťových princípov. Popísané sú tiež aproximačné vzťahy pre stanovenie veľkosti plastických zón malého rozsahu.

Teoreticky sú uvedené princípy pružno-plastickej lomovej mechaniky a základné lomové parametre pre pružno-plastické materiály. Aplikovateľnosť tohto prístupu je ukázaná v prípade plastických deformácií veľkého rozsahu.

V práci je ďalej uvedený koncept časovo závislej lomovej mechaniky. Popísané sú princípy elasto-dynamickej lomovej mechaniky a kritériá nestabilného rastu trhliny.

Popísané sú analytické a numerické prístupy a riešenia vybraných úloh lomovej mechaniky. Nadobudnuté teoretické poznatky sú aplikované na konkrétnych príkladoch a konfrontované s publikovanou literatúrou. Z analýz sú stanovené predpoklady a odporúčania numerického modelovania telies s trhlinou. Pre konkrétne typy úloh sú uvedené vhodné konečno-prvkové elementy pre modelovanie a ich geometrické usporiadanie v telese. Vyhodnotené sú porovnania analytických riešení

a vlastnej numerickej simulácie problému. Odskúšaná je aj metodika výpočtu hnacej sily trhliny na dvoch telesách.

Podrobnejšie je analyzovaný výpočet koeficientu intenzity napätia (*SIF*). Hodnoty *SIF* boli určené podľa: aproximačných vzťahov, extrapolačnou metódou (napätí a premiestnení), metódou posunutých uzlov a interakčným integrálom. Úlohy boli riešené ako rovinné aj ako priestorové. Bola urobená analýza vplyvu konečnoprvkovej siete na základe typu a veľkosti elementov. Teoretické plastické zóny v blízkom okolí trhliny sú porovnané s numerickou simuláciou problému. Popísané sú predpoklady numerického modelovania pružno-plastického materiálu. Plastické zóny pre úlohy vystavené čistému zaťažovaciemu módu *I* a zmiešanému módu namáhaniu trhliny, sú stanovené jednak pre rovinné úlohy za podmienok rovinnej napätosti a rovinnej deformácie, jednak pre úlohy priestorové.

Popísané sú experimentálne merania dynamického koeficientu intenzity napätia. Predstavená je prípravná fáza, numerická analýza problému, ktorá poslúžila pri výbere geometrie vzoriek, vyhodnotení budúcich nameraných výsledkov a pri prvotnom nastavení meracej zostavy. V rámci prípravy boli tiež zhodnotené jednotlivé numerické metódy na určenie dynamického koeficientu intenzity napätia a aplikovateľnosť ich použitia. Na tieto účely bol použitý rovinný aj priestorový variant metódy konečných prvkov v programovom prostredí ANSYS Workbench a vlastné prídavné algoritmy pri automatizácií tvorby numerických modelov a sietí, ako aj vyhodnocovaní vypočítaných a nameraných výsledkov. V rámci experimentálnych meraní bola využitá optická metóda, založená na difrakcii svetla za úzkou štrbinou s tým, že signál bol snímaný a spracovaný fotoelektricky. Metóda bola použitá na zvolených vzorkách, výsledky experimentálnych meraní boli spracované graficky aj štatisticky. Zaznamenané a analyzované boli časové priebehy zaťažovacích síl spolu so zodpovedajúcimi časovo závislými priebehmi koeficientu intenzity napätí. V rámci analýzy boli skúmané viaceré varianty zaťaženia a geometrie, ich vplyv na vyvolanie zmiešaného namáhania trhliny. Tieto varianty boli skúmané jednak priamo počas experimentu ale aj vytvorením parametrického modelu v numerickej analýze.

Pri porovnávaní časových závislostí dynamických koeficientov intenzity napätí možno zhodnotiť veľmi dobrú zhodu experimentu s numerickou simuláciou. Zvolená experimentálna optická metóda sa javí ako vhodná jednak na monitorovanie rýchlych mechanických pohybov trhliny ako aj pre statické riešenia. Vzhľadom k povahe merania je možná aplikovateľnosť tohto princípu v laboratórnych aj in-situ meraniach. Princíp merania je nezávislý na okolitých podmienkach akými sú napríklad teplota, vlhkosť alebo agresivita prostredia. Metodika môže byť použitá aj v nelineárnej lomovej mechanike, prípadne pre komplikované prípady konštrukcií, kedy je náročné zadefinovať okrajové podmienky úlohy.

7 Použitá literatúra

- Richard, H.A. & Eberlein, A. (2016). 3D-mixed-mode-loading: Material characteristic values and criteria's validity. Frattura ed Integrità Strutturale. 10. 80-86. 10.3221/IGF-ESIS.37.11.
- [2] Berto, Filippo, Campagnolo, Alberto, Pook, Les. (2015). Three-dimensional effects on cracked components under anti-plane loading. Fratt. ed Int.à Stru. 33. 17-24. 10.3221/IGF-ESIS.33.03.
- [3] Krejsa, Martin & Koubova, Lenka & Flodr, J & Protivínský, Jiri & Nguyen, Qui. (2017). Probabilistic prediction of fatigue damage based on linear fracture mechanics. 11. 143-159. 10.3221/IGF-ESIS.39.15
- [4] Cheng, Zhenxing & Wang, Hu. (2018). How to control the crack to propagate along the specified path feasibly?. Comp. Met. in App. Mech. and Eng. 336. 10.1016/j.cma.2018.03.029.
- [5] Citarella, Roberto, Giannella, Venanzio, Lepore, Marcello Antonio. (2015). DBEM crack propagation for nonlinear fracture problems. Fratt. ed Int. Strutt. 9. 514-523. 10.3221/IGF-ESIS.34.57.
- [6] Malíková, L. & Vavro, Leona & Vavro, Martin & Keršner, Zbyněk. (2019). Evaluation of fracture response of Silesian granite specimens via Effective Crack Model approach and finite element analysis. Procedia Structural Integrity. 23. 487-492. 10.1016/j.prostr.2020.01.133.
- [7] Boulenouar, A, Benseddiq, Noureddine, Mazari, M, Benamara, N. (2014). FE model for linearelastic mixed mode loading: Estimation of sifs and crack propagation. J. of Th. and App. Mech. 52.
- [8] Žmindák, M. & Kormanikova, Eva & Novák, Pavol & Soukup, Josef & Kotrasova, Kamila. (2020). Application of discrete damage mechanics for determination of the crack density in composite laminates. MATEC Web of Conferences. 310. 00002. 10.1051/matecconf/202031000002.
- [9] Krepl, O.; Klusák, J.: Crack onset assessment near the sharp material inclusion tip by means of modified maximum tangential stress criterion, Focused on Mechanical Fatigue of Metals, (2017) 66-73; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.42.08
- [10] Arnoult, X.C. & Ruzickova, Mariana & Kunzova, Klara & Materna, Andy. (2016). Short review: Potential impact of delamination cracks on fracture toughness of structural materials. Frattura ed Integrità Strutturale. 10. 509-522. 10.3221/IGF-ESIS.35.57.
- [11] A Aguilar Espinosa, A & Fellows, N & Durodola, John & J Fellows, L. (2016). Development of numerical model for the determination of crack opening and closure loads, for long cracks. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 40. 10.1111/ffe.12532.
- [12] Vukelic, Goran & Brnic, Josip. (2011). J-Integral As Possible Criterion In Material Fracture Toughness Assessment. Engineering Reviev. 31. 91-96.
- [13] Nowell, D, O'Connor, S.J., Dragnevski, Kalin. (2015). Measurement and analysis of fatigue crack deformation on the macro- and micro-scale. Fratt. ed Int. Stru. 9. 1-7. 10.3221/IGF-ESIS.33.01.
- [14] Campilho, Raul, Banea, M, Silva, L.F.M. (2015). Advanced techniques for estimation of the tensile fracture toughness of adhesive joints. Fratt. ed Int. Stru. 10.3221/IGF-ESIS.31.01.
- [15] Larrosa, Nicolas & Ainsworth, R.A.. (2016). Ductile fracture modelling and J-Q fracture mechanics: A constraint based fracture assessment approach. 10. 266-272. 10.3221/IGFESIS.38.36.
- [16] Moustabchir, Hassane & Zitouni, Azari & Hariri, S & Gilgert, Joseph & Pruncu, Catalin. (2017). Experimental–Numerical Characterization of the Fracture Behaviour of P264GH Steel Notched Pipes Subject to Internal Pressure. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering. 10.1007/s40997-017-0086-0.
- [17] Gintalas, Marius & Ziliukas, Antanas & Kalnins, Kaspars. (2011). Dynamic J -Integral Evaluation of Three-Point-Bend Beams with Various Geometrical Dimensions. Key Engineering Materials. 488-489. 630-633. 10.4028/www.scientific.net/KEM.488-489.630.
- [18] Habtour, Ed & Paulus, Mark & Dasgupta, Abhijit. (2014). Modeling Approach for Predicting the Rate of Frequency Change of Notched Beam Exposed to Gaussian Random Excitation. Shock and Vibration. 2014. 10.1155/2014/164039.
- [19] Liu, Yongming & Lu, Zizi & Xu, Jifeng. (2012). A simple analytical crack tip opening displacement approximation under random variable loadings. International Journal of Fracture. 173. 10.1007/s10704-012-9682-6.

- [20] Itou, Shouetsu. (2010). Dynamic Stress Intensity Factors for Three Parallel Cracks in an Infinite Plate Subject to Harmonic Stress Waves. Engineering. 02. 485-495. 10.4236/engineering.2010.27064.
- [21] ANDERSON T.L.: Fracture mechanics, Fundamentals and Applications, CRC Press, 688s, 1995 ISBN 978-1-4200-5821-5
- [22] Kuang, J.H., A displacement extrapolation method for two-dimensional mixed mode crack problems, Engineering Fracture mechanics Vol.46 No. 5, pp.735-741
- [23] Guinea, G.V., KI evaluation by the displacement extrapolation technique, Engineering Fracture Mechanics 66(2000) 243-255
- [24] Qiunghua H., Determination of stress intensity factor for mode I fatigue crack based on finite element analysis, Engineering Fracture Mechanics 138 (2015) 118-126
- [25] ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 17.2, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
- [26] Dodds R.H. Jr., Anderson T.L., and Kirk, M.T.: A framework to Correlate a/W Effects on Elastic-Plastic Fracture Toughness (Jc), International Journal of Fracture. Vol.48, 1991, pp.1-22
- [27] Balas, Jan & Drzik, Milan & Sladek, Jan & Sladek, Vladimir. (1988). Measurement of dynamic stress intensity factor under impact loading. 36. 361-371.
- [28] Reed, J. Energy losses due to elastic wave propagation during impact. J. Phys. D: Appl. Phys. 1985, Volume 18, pp. 2329-2337
- [29] Hunter S C 1957 J. Mech. Phys. Solids 5 162-71
- [30] Fujino, Y.; Kishimoto, K.; Aoki, S.; Sakata, M. Simple formula for the dynamic stress intensity factor of an impacted freely- 317 supported bend specimen. Trans. Of the Jap. Soc. Of Mech. Eng. Ser. A 1988, Volume 54, pp. 1101-1106.
- [31] Marur, P. Dynamic analysis of one-point bend impact test. Eng. Fract. Mech. 2000, Volume 67, pp. 41-53.
- [32] Yang, Y.; Chen, X.D.; Fan, Z.C.; Wu, Q.G. Analysis of the Dynamic Stress Intensity Factor of an Impacted Freely Supported 320 Bend Specimen Based on Modified Timoshenko's Beam Theory, Procedia Engineering 14th International Conference on Pres- 321 sure Vessel Technology, Shanghai, China, 23-26.9 2015, Editor Tu, S.-T., et al., pp. 731-745.
- [33] Rokach, I. On the influence of one-point-bend impact test parameters on dynamic stress intensity factor variation. Mater. Sci. 323 eng. A-Sstruct. Mater. 1997, pp. 838-841
- [34] R. Keys (1981). "Cubic convolution interpolation for digital image processing". *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 29 (6): 1153–1160.

8 Zoznam publikovaných prác autora

Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

<u>TURIS, Matúš</u> – <u>IVÁNKOVÁ, Oľga</u> – <u>BURIK, Peter</u> – <u>DRŽÍK, Milan</u>. Determination of Stress Intensity Factors under Shock Loading Using a Diffraction-Based Technique. In Applied Sciences [elektronický zdroj]. Vol. 11, Iss. 10 (2021), online, [12] s., art. no. 4574. ISSN 2076-3417 (2019: 2.474 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.418 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC, SCOPUS; DOI:10.3390/app11104574.

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

<u>TURIS, Matúš</u> - <u>IVÁNKOVÁ, Oľga</u>. Effect of impulse loading on cracked beam with Lshaped cross section. In Dynamics of Rigid and Deformable bodies 2019 [elektronický zdroj] : proceedings of the XVIIth International Scientific Conference. Ústí nad Labem, Czech Republic, 9-11 October 2019. 1. vyd. Melville, New York : AIP Publishing, 2019, online, [10] s., art. no. 020020. ISBN 978-0-7354-1949-0. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85077856709 ; DOI: 10.1063/1.5140881.



<u>TURIS, Matúš</u> - KÚKOL, Jakub - <u>IVÁNKOVÁ, Oľga</u>. Stanovenie dynamického koeficientu intenzity napätia pre konzolový nosník s prierezom v tvare písmena L. In *Juniorstav 2020* [elektronický zdroj] : sborník příspěvků. 22. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účasti. Brno, ČR, 23. 1. 2020 = Juniorstav 2020, proceedings of the 22nd International Conference of doctoral Students. 1. vyd. Brno : ECON publishing, 2020, USB kľúč, s. 445-451. ISBN 978-80-86433-73-8.

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

<u>TURIS, Matúš</u> - <u>IVÁNKOVÁ, Oľga</u>. Výpočet faktoru intenzity napätia pre centrálnu šikmú trhlinu. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : conference proceedings. 16th International Conference. Bratislava, Slovakia, 18. - 19. 10. 2018.* 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2018, online, [7] s. ISBN 978-80-227-4845-2.

<u>TURIS, Matúš</u>. Stanovenie lomových parametrov vo vrcholoch trojuholníkového otvoru. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 28th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 24th 2018, Bratislava. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2018, CD-ROM, s. 75-83. ISBN 978-80-227-4864-3.

<u>TURIS, Matúš</u>. Plastická zóna malého rozsahu v okolí trhliny. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 29th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 16th 2019, Bratislava 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2019, CD-ROM, s. 48-53. ISBN 978-80-227-4972-5.

TURIS, Matúš - IVÁNKOVÁ, Oľga. Using finite element analysis to obtain plastic zones in the vicinity of the crack edges, under mixed mode loading conditions. In 4th International Scientific Conference Structural and Physical Aspects of Construction Engineering (SPACE 2019) [elektronický zdroj] : Štrbské Pleso, Slovakia, November 13-15, 2019. 1. vyd. Londýn : EDP Sciences, 2020, online, [8] s., art. no. 00028. ISSN 2261-236X. V databáze: DOI: 10.1051/matecconf/202031000028 ; WOS: 000638061500028.

Ohlasy:

 [1] STEPANOVA, L. V. Asymptotic stress fields near the crack tip in perfect plastic materials under mixed mode loading (plane strain conditions). In Journal of Physics: Conference Series, 2021, Vol. 1745, no. 1, pp. ISSN 1742-6588., Registrované v: SCOPUS

 STEPANOVA, L. V. - PEKSHEVA, A. A. Mixed mode fracture in perfect plastic materials for plane stress conditions. In Journal of Physics: Conference Series, 2021, Vol. 1745, no. 1, pp. ISSN 1742-6588, Registrované v: SCOPUS
STEPANOVA, L. V. Asymptotic stress fields in the vicinity of the crack in perfectly plastic solids under mixed mode loading. In PNRPU Mechanics Bulletin, 2020, Vol. 2020, no. 3, pp. 73-89. ISSN 2224-9893., Registrované v: SCOPUS

<u>TURIS, Matúš</u> - DRŽÍK, Milan - <u>IVÁNKOVÁ, Oľga</u>. Theoretical study for estimation of the dynamic stress intensity factor from results of an experimental measurement. In *Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering - DYN*-



WIND '2020 [elektronický zdroj] : Vyhne, Slovak Republic, May 24-28, 2020. 1. vyd. Londýn : EDP Sciences, 2020, online, [6] s., art. no. 00041. ISSN 2261-236X. V databáze: DOI: 10.1051/matecconf/202031300041 ; WOS: 000568654100041.

Publikačná činnosť v iných oblastiach ako je predmet dizertačnej práce

<u>TURIS, Matúš</u> - <u>IVÁNKOVÁ, Oľga</u>. Modelovanie fáz výstavby a ich porovnanie s lineárnym konečno prvkovým modelom. In *Juniorstav 2018 [elektronický zdroj] : sborník příspěvků. 20. odborná konference doktorského studia. Brno, ČR, 25. 1. 2018* = Juniorstav 2018, proceedings of the 20th International Conference of Ph.D. Students. 1. vyd. Brno : ECON publishing, 2018, USB kľúč, s. 633-637. ISBN 978-80-86433-69-1.

VOJTEKOVÁ, Eva - <u>TURIS, Matúš</u> - VANEK, Michal - <u>IVÁNKOVÁ, Oľga</u>. Static assessment of selected transparent and translucent designs of roof over railway exposition. In *Proceedings* of the TensiNet Symposium 2019 : Softening the Habitats. 3-5 June 2019, Milan, Italy. 1. vydanie. Milan, Italy : Maggioli SpA, 2019, S. 497-504. ISBN 978-88-916-3245-6. V databáze: DOI: 10.30448/ts2019.3245.47.

VOJTEKOVÁ, Eva - <u>IVÁNKOVÁ, Oľga</u> - <u>TURIS, Matúš</u>. Variant roofing solutions over exposition of historical railway locomotives and cranes = Variantné riešenia zastrešenia expozicie historických železničných lokomotív a vozňov. In Architecture in Perspective 2019. Proceedings of the International Conference / Sborník příspěvků z mezinárodní konference : 2-3 October 2019, Ostrava; 11. ročník mezinárodní a interdisciplinární konference věnované architektuře a urbanismu. 1. vyd. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2019, S. 211-214. ISBN 978-80-248-4331-5. V databáze: WOS: 000505658000044.

IVÁNKOVÁ, Oľga - TURIS, Matúš - MÉRI, Dávid. Static and Dynamic Analysis of the Bearing Exoskeleton of a High-Rise Building Subjected to Wind and Seismic Effects. In Proceeding of the International Conference ACOUSTICS 2019 High Tatras [elektronický zdroj] : a joint event of MAP and ATF 2019. October 16-18, 2019, Štrbské Pleso, Slovakia. 1. vyd. Zvolen : TU Zvolen, 2019, online, s. 236-242. ISBN 978-80-228-3157-4.

<u>TURIS, Matúš</u> - <u>IVÁNKOVÁ, Oľga</u>. Vplyv modelovania fáz výstavby na statické pôsobenie výškovej budovy. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : conference proceedings. 15th International Conference. Bratislava, Slovakia, 19. - 20. 10. 2017.* 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2017, CD-ROM, [7] s. ISBN 978-80-227-4732-5.