



Projekt financovaný:	Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied
Typ a číslo projektu:	VEGA 1/0363/21
Názov projektu:	Trhliny v kompozitných konštrukčných prvkoch a ich interakcie pri mechanickom namáhaní
Vedúci projektu:	prof. Ing. Roman VODIČKA, PhD.
Riešitelia projektu:	prof. Ing. Eva KORMANÍKOVÁ, PhD. doc. RNDr. Pavol PURCZ, PhD. doc. Ing. Marián ROVNÁK, PhD. Ing. Štefan KUŠNÍR, PhD. Ing. Peter SABOL, PhD. RNDr. Katarína KRAJNÍKOVÁ, PhD. RNDr. Andrea KANÁLIKOVÁ, PhD. Ing. Maroš KOVÁČ
Doba riešenia projektu:	01.01.2021 – 31.12.2024

## ANOTÁCIA

Definícia výpočtových modelov pre analýzu defektov vo vnútri materiálu reprezentovaných regularizovanými trhlinami pomocou vnútorných premenných a pre trhliny na materiálových rozhraniach reprezentované pomocou adhézneho kontaktu umožňujúce rozlišovať módy vznikajúcich trhlín pri kvázi-statickom aj dynamickom zaťažení. Implementovanie modelov do vlastného výpočtového kódu v MATLABe založeného na konečnoprvkových aj hraničnoprvkových diskretizačných metódach. Použitie metód sekvenčného kvadratického programovania v implementačných modeloch vychádzajúc z variačnej formulácie mechanizmov tvorby a šírenia trhlín. Modelovanie prvkov stavebných konštrukcií s defektmi spôsobenými trhlinami z hľadiska ich mikromechanickej aj makromechanickej štruktúry. Experimentálne modelovanie prvkov konštrukcií pre verifikáciu navrhnutých modelov v analýze delaminačných trhlín a trhlín súvisiacich s inklúziami v materiáli a iných materiálových rozhraní pri rôznych typoch materiálových skúšok.

## DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Projekt bol zameraný na vytvorenie nových efektívnych postupov v oblasti simulácie inicializácie a šírenia trhlín materiálu pri mechanickom namáhaní.

V prvej časti bol predstavený výpočtový model na analýzu poškodenia rozhrania, ktorý popisuje inicializáciu a rast trhlín pozdĺž poškodeného rozhrania vo viacdoménovej štruktúre zaťaženej periodickému zaťaženiu. Simulácia procesov poškodenia v ňom uvažuje vzťahy medzi napätím na rozhraní a deformáciou, ktoré vedú k oddeleniu subdomén, formou typickou pre modely kohéznych zón ale s vnútorným parametrom poškodenia zodpovedným za tieto trhliny určeným tenkou vrstvou adhezíva. Tento model bol vybavený tiež druhom viskozity poškodenia rozhrania, aby simulácie modelom zohľadňovali periodické zaťažovanie a odľahčovanie, čo vedie k procesu poškodenia s únavovým charakterom. Výpočty týmto modelom poskytli dôkazy o takomto správaní a vhodnosti navrhnutého modelu v situáciách, keď je konštrukcia vystavená opakovaným cyklom zaťaženia.

Podobný typ poškodenia súvisiaci so vznikom trhlín na rozhraní súvisí aj s javom, ktorý sa nazýva delaminácia. Vyhodnocovanie trhlín v dôsledku delaminácie bolo tiež sledované a dokumentované. Boli skúmané materiálové



vlastnosti polyméru vystuženého uhlíkovými vláknami (CFRP) a delaminácia v ňom. Experimentálne získané hodnoty boli porovnané s charakteristikami nedelaminovanej vzorky. Experiment bol uskutočnený pomocou nedeštrukčnej dynamickej metódy (impulsive excitation technique). Pomocou viacúrovňového modelovania, mikro-mezo (metóda Mori-Tanaka), boli určené charakteristiky tkaného CFRP kompozitu s pórmí a použitím makroštruktúrového modelovania bol uskutočnený návrh zastrešenia pavilónov CFRP. Podobné modelovania bolo použité aj pri seizmickej analýze laminátového CFRP.

Trhliny sa však vyvíjajú aj vo vnútri samotných materiálov a cieľom bolo vytvoriť aj model interakcie takýchto trhlín. Vyvinutý výpočtový prístup je schopný iniciovať a šíriť trhliny oboch typov za kvázi-statických podmienok s osobitnou pozornosťou venovanou situácii pevnej látky s inklúziami. Tak ako aj v prípade rozhraní bol opis lomových procesov založený na teórii poškodenia materiálu s vnútornými parametrami. Týmto spôsobom boli zavedené dva nezávislé parametre poškodenia na rozlíšenie medzi rozhraním a materiálom. Parameter na rozhraní bol uvažovaný ako vyššie, druhý parameter bol definovaný vo vnútri materiálových domén a založený na teórii lomu s rozmazanými trhlinami s charakteristikou fázového poľa poškodenia, kde takáto degradácia sa deje v úzkom páse materiálu. Pre konštrukcie vystavené kombinovanému zaťaženiu bolo užitočné rozlíšiť módy lomu. Vo vyvinutom výpočtovom modeli je táto vlastnosť zahrnutá pre oba typy poškodenia. Metodika riešenia, ktorá to umožnila, je založená na variačnom prístupe, ktorý umožňuje implementáciu metód nelineárneho programovania (SQP) do štandardných algoritmov konečnoprvkovej diskretizácie (FEM) a časového krokovania (TD). Výpočtová implementácia bola pripravená v MATLABe a testovaná typickými problémami viacdoménových štruktúr, najmä tých s inklúziami.

Pre zohľadnenie vplyvu rýchlosti zaťažovania a konečnej rýchlosti šírenia trhlín v materiáloch bol vypracovaný aj model dynamický. Bol formulovaný výpočtový model na štúdium dynamického šírenia trhlín v materiáloch vystavených časovo závislému zaťaženiu, pri ktorom zotrvačné účinky zohrávajú dôležitú úlohu pri šírení trhlín. Tak ako v ostatných navrhnutých modeloch bol použitý aj tu model s vnútorným parametrom, konkrétne fázové pole poškodenia. Variačný spôsob riešenia aj tu využil MATLAB pre vytvorenie počítačového kódu na získanie číselných údajov s využitím FEM algoritmov, TD a SQP. Vyvinutý kód zahŕňa aj modifikáciu tohto dynamického modelu pre riešenie šírenia trhlín vo viackomponentových materiáloch, napr. obsahujúcich inklúzie.

Preukázanie konzistentnosti alebo validity navrhnutých výpočtových modelov vyžadovalo aj experimentálne overovanie. Boli prezentované metódy a postupy výpočtového a experimentálneho prístupu modelovania delaminácie v móde I medzi anizotropnými materiálmi. Táto časť výskumu bola venovaná porovnaniu variačnej formulácie implementovanej MATLABom s experimentálnym vyhodnotením delaminácie v otváracom móde trhliny vznikajúcej v kompozitných polymérnych materiáloch vystužených uhlíkovými vláknami.

Pre implementáciu modelov do stavebných konštrukcií sa vykonali aj experimenty s betónom alebo podobným materiálom s inklúziami. Vykonali sa skúšky telies s inklúziami, kde boli tri druhy inklúzií, ako inklúzie boli zvolené oceľové valce rôznych priemerov bez povrchovej úpravy, valce povrchovo upravené lepidlom a prázdne dutiny, v skúšobných telesách adekvátnych rozmerov. Pre testovanie vplyvu inklúzie bolo vytvorených viacero druhov usporiadania inklúzií aj bez nich. Štatisticky sa vyhodnotilo mnoho vzoriek, veď len s oceľovými inklúziami vzniklo takmer 200 vzoriek. Okrem týchto vzoriek boli realizované aj skúšky materiálových vlastností betónu, najmä na stanovenie pevnosti v tlaku, ťahu a modulov pružnosti. Experimenty boli navrhnuté tak, aby s ohľadom na ich rozsah boli na záver jednotlivé vlastnosti parametrizované a aby sa dali vzájomne porovnávať skúšky. Tu bol skúmaný jednak vplyv rozmiestnenia inklúzií a tuhosti inklúzie na odolnosť vzorky, jednak boli sledované zmeny vo vzniku a rozvoji trhlín pri zmene umiestnenia inklúzií, ako aj ich veľkosti. Vzorky boli skúšané so záznamom posunu lisu resp. stlačenia vzorky a pomocou fotogrametrie (Aramis gom) boli zisťované ďalšie možné vlastnosti ako vznik, rozvoj trhlín, napätia ap. Súbežné modelovanie v komerčnom softvéri (Atena) poukázalo na nutnosť rozšírenia experimentu a doplnenie ďalších parametrov napr. pre rozhrania.



Z ďalších experimentálnych činností prebehli pretlačacie, odtrhové skúšky, zmrašťovacie skúšky telies s inklúziou a bez, kde bolo určované zovretie inklúzie resp. vznik počiatkových napätí od zmraštenia spôsobujúcich iniciáciu vzniku trhlín. Táto inklúzia bola oceľová v tvare valca, prázdna dutina o geometrii oceľovej inklúzie resp. prázdna dutina so zamedzením odparovania z obvodu inklúzie (fóliový nástrek); merané pomocou fotogrametrie, aj tenzometrov v radiálnom aj tangenciálnom smere. Pre skúšanie vplyvu veľkostného efektu boli uvažované materiály s rôznym zrnom kameniva, no pre implementáciu výpočtového modelu boli skúšky redukované na homogénny materiál, na čo slúžila samostatná séria skúšok na preosiatych veľmi jemnozrnných maltách. Skúšky s veľkostným efektom boli doplnené o skúšky rôzne veľkých telies zaťažovaných tlakom a meraných fotogrametriou pri zmenených okrajových podmienkach, v ktorých bol skúšaný aj vplyv trenia na kontakte s lisom a nerovnomerné rozdelenie napätí. Rovnako boli zabezpečené formy, výstuž a celá metodika skúšok rámových uzlov s inklúziami a bez nich za účelom skúmania nerovnomerného pôsobenia napätí v šmyku.

### Najvýznamnejšie publikované práce:

VODIČKA, Roman: *A mixed-mode dependent interface and phase-field damage model for solids with inhomogeneities* / Theoretical and Applied Fracture Mechanics. Amsterdam (Holandsko): Elsevier Science, 1984 Roč. 127 (2023), s. [1-18] [print, online]. ISSN 0167-8442

Spôsob prístupu: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.104009>

Impakt faktor: 5.00

KORMANÍKOVÁ, Eva – KŠIŇAN, Filip – VODIČKA, Roman: *Computational and experimental approaches for Mode I delamination problems* / International journal of solids and structures. Oxford (Veľká Británia): Elsevier B.V. č. 300 (2024), s. [1-10] [print]. ISSN 0020-7683

Spôsob prístupu: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.112926>

Impakt faktor: 3.40

VODIČKA, Roman: *A new quasi-static delamination model with rate-dependence in interface damage and its operation under cyclic loading* / In: International journal of solids and structures. č. 224 (2021), s. [1-14] [print]. ISSN 0020-7683

Spôsob prístupu: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.03.022>

Impakt faktor: 3.40

VODIČKA, Roman: *A computational approach for phase-field model of quasi-brittle fracture under dynamic loading* / International journal of fracture. Springer. 248 (2024), s. [127-152]. ISSN 0376-9429

Spôsob prístupu: <https://doi.org/10.1007/s10704-024-00806-2>

Impakt faktor: 2.20

KORMANÍKOVÁ, Eva – KOTRASOVÁ, Kamila: *Micro-macro modelling of laminated composite rectangular reservoir* / Composite Structures. Amsterdam (Holandsko): Elsevier Roč. 279 (2021), s. [1-10] [print, online]. ISSN 0263-8223

Spôsob prístupu: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114701>

Impakt faktor: 6.30