

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2026

Ing. Ondrej Piroh



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Ondrej Piroh

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Analýza mechanických vlastností konštrukčných materiálov aplikáciou numerických a optických prístupov na vybranom konštrukčnom materiáli

Na získanie akademického titulu **doktor**
(„**philosophiae doctor**“, v skratke „**PhD.**“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe Mechanika a konštrukcia strojov

Žilina 2026

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre aplikovanej mechaniky.

Predkladateľ: Ing. Ondrej Piroh
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra aplikovanej mechaniky

Školiteľ: doc. Ing. Milan Vaško, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra aplikovanej mechaniky

Oponenti:

1. doc. Ing. Milan Nad', CSc.
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Materiálovo technologická fakulta STU so sídlom v Trnave
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky
2. prof. Ing. Robert Grega, PhD.
Technická univerzita v Košiciach
Strojnícka fakulta
Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva
3. doc. Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.
Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra aplikované mechaniky

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 20.8.2026 o 10:30 hod. v miestnosti BA 205 na SjF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Mechanika a konštrukcia strojov, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SjF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

Dr. h. c. prof. Dr. Ing. Milan Sága
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

ÚVOD

Poznanie mechanických vlastností materiálov je nevyhnutnou podmienkou pre návrh spoľahlivých konštrukcií. Ich určovanie si vyžaduje presné a opakovateľné experimentálne merania realizované podľa štandardizovaných postupov. Pri mechanických skúškach sa často využívajú kontaktné alebo bezkontaktné extenzometre na meranie posunutí. Zatiaľ čo kontaktné systémy poskytujú vysokú presnosť, ich použitie je obmedzené rozsahom merania a spôsobom upevnenia. Moderné bezkontaktné metódy založené na digitálnej obrazovej korelácii umožňujú flexibilnejšie meranie, ich nevýhodou sú však vysoké obstarávacie náklady, náročné spracovanie dát a požiadavky na špeciálne vybavenie.

V súčasnosti preto rastie záujem o nové prístupy založené napríklad na počítačovom videní, ktoré by umožnili realizovať dostatočne presné merania pri nižších vstupných nákladoch a s využitím bežne dostupného laboratórneho vybavenia. Na základe tejto potreby bola v rámci dizertačnej práce navrhnutá a vyvinutá nová metóda bezkontaktného merania posunutí využívajúca princípy počítačového videnia.

Cieľom práce bolo analyzovať možnosti využitia počítačového videnia pri meraní posunutí, vytvoriť funkčný bezkontaktný extenzometer a následne pomocou neho určiť vybrané mechanické vlastnosti zvoleného materiálu. Teoretická časť práce sa venuje základom počítačového videnia, spracovania obrazu a ich aplikáciám v experimentálnej mechanike. Zároveň obsahuje prehľad relevantných vedeckých prác, opis použitých algoritmov a softvérových nástrojov, ako aj základné princípy metódy konečných prvkov a materiálových modelov. Súčasťou teoretickej časti je aj podrobný opis princípu navrhnutého bezkontaktného extenzometra.

Praktická časť práce je zameraná na návrh, implementáciu a experimentálnu verifikáciu vyvinutého bezkontaktného extenzometra. Navrhnutý prístup bol implementovaný do samostatnej softvérovej aplikácie využívajúcej metódu počítačového videnia na detekciu ťažísk vybraných markerov a vyhodnocovanie deformácií počas mechanických skúšok. Významná časť práce bola venovaná overeniu presnosti a spoľahlivosti navrhnutého systému prostredníctvom série experimentov a jeho porovnaní s konvenčnými meracími metódami. Následne bol vytvorený extenzometer využitý pri riešení viacerých praktických úloh experimentálnej mechaniky. Medzi ne patrilo určovanie mechanických vlastností termoplastu PETG na základe výsledkov ťahových skúšok, stanovenie Poissonovho čísla z meraní pozdĺžnych a priečných posunutí resp. deformácií, ako aj analýza deformačných polí v okolí koncentrátora napätí v tvare vrubu. Získané experimentálne dáta boli následne použité na identifikáciu parametrov materiálového modelu a jeho verifikáciu pomocou numerických simulácií založených na metóde konečných prvkov. Výsledkom práce je nielen funkčný bezkontaktný extenzometer s jednoduchou implementáciou a nízkymi nárokmi na hardvérové vybavenie, ale aj experimentálne overený postup jeho využitia pri analýze mechanického správania materiálov. Navrhnuté riešenie predstavuje cenovo dostupnú alternatívu ku komerčným systémom, pričom dosahuje dostatočnú presnosť pre široké spektrum inžinierskych úloh a výskumných aplikácií. Nemenej dôležitým výsledkom práce je aj plne funkčný a verifikovaný materiálový model, ktorý je priamo aplikovateľný pre výpočty pomocou metódy konečných prvkov.

STRUČNÝ PREHĽAD PROBLEMATIKY

Mechanické skúšanie materiálov predstavuje základný nástroj na určovanie ich mechanických vlastností a správania pri zaťažení [1-3]. Presné meranie posunutí je nevyhnutné nielen pre stanovenie mechanických vlastností materiálov, ale aj pre tvorbu a verifikáciu numerických modelov využívaných pri návrhu konštrukcií. V súčasnosti sa na tieto účely používajú kontaktné ale aj bezkontaktné extenzometre [3]. Kontaktné systémy poskytujú vysokú presnosť merania, ich použitie je však obmedzené rozsahom merateľných deformácií, či spôsobom upevnenia.

V posledných desaťročiach sa preto výrazne rozšírili bezkontaktné metódy merania založené na digitálnom spracovaní obrazu. Medzi najvýznamnejšie patrí digitálna obrazová korelácia (DIC), ktorá umožňuje sledovať deformácie a posunutia povrchu skúmaného objektu bez priameho kontaktu [4, 8-10]. Napriek vysokej presnosti sú však komerčné DIC systémy finančne náročné, vyžadujú špecializované hardvérové vybavenie, výkonné výpočtové prostriedky a často aj úpravu povrchu vzoriek [8-10].

Významný rozvoj v oblasti počítačového videnia, digitálneho spracovania obrazu a dostupnosti výpočtovej techniky vytvoril predpoklady pre vývoj nových nízko nákladových meracích systémov [19,20]. Moderné algoritmy umožňujú detekciu, segmentáciu a sledovanie objektov v obraze s dostatočnou presnosťou aj pri využití bežne dostupných kamier. Tieto prístupy nachádzajú uplatnenie nielen v priemyselnej automatizácii [13], doprave [11] či bezpečnostných systémoch [12], ale čoraz častejšie aj v oblasti experimentálnej mechaniky [14,35-40].

Predkladaná dizertačná práca sa zaoberá využitím metód počítačového videnia pri bezkontaktnom meraní posunutí a deformácií. Pozornosť je venovaná návrhu a implementácii vlastného bezkontaktného extenzometra, jeho experimentálnemu overeniu a aplikácií pri určovaní mechanických vlastností materiálov. Riešená problematika nadväzuje na aktuálne trendy v oblasti experimentálnych meraní a predstavuje príspevok k vývoju cenovo dostupných meracích systémov využiteľných vo výskumnej a priemyselnej praxi.

TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Cieľom práce je: „Analýza mechanických vlastností konštrukčných materiálov aplikáciou numerických a optických prístupov na vybranom konštrukčnom materiáli“.

Na dosiahnutie hlavného cieľa práce budú realizované nasledovné čiastkové ciele:

1. Návrh metodiky a tvorba algoritmov pre vytvorenie bezkontaktného extenzometra založeného na analýze obrazu, ktorý umožní meranie posunutí bez potreby použitia špecializovaného a finančne náročného experimentálneho vybavenia.
2. Vývoj softvérovej aplikácie v prostredí App Designer určeného na spracovanie obrazových záznamov a vyhodnocovanie posunutí. Súčasťou aplikácie bude aj používateľská príručka zabezpečujúca jednoduché a intuitívne používanie vytvoreného systému aj používateľmi bez detailných znalostí navrhutej metodiky.
3. Overenie funkčnosti a presnosti navrhnutých algoritmov prostredníctvom experimentálnych meraní a následného porovnania získaných výsledkov s výsledkami bezkontaktného extenzometra využívajúceho princíp digitálnej obrazovej korelácie.
4. Vytvorenie materiálového modelu pre termoplast PETG na základe experimentálne získaných dát, vrátane jeho implementácie do numerického prostredia a následnej verifikácie prostredníctvom MKP analýzy.

ZVOLENÉ METÓDY SPRACOVANIA

Predkladaná dizertačná práca využíva kombináciu experimentálneho prístupu, algoritmy spracovania obrazu a numerické výpočty v mechanike kontinua [19,20,51]. Navrhnutý postup bol rozdelený do troch nadväzujúcich fáz, ktoré spoločne tvoria ucelený systém pre realizáciu bezkontaktného extenzometra využívajúceho princípy počítačového videnia.

V prvej fáze bola pozornosť venovaná návrhu a implementácii algoritmov počítačového videnia pre bezkontaktné meranie posunutí. Tento proces zahŕňal realizáciu mechanických skúšok so súčasným optickým snímaním a tvorbou obrazového záznamu. Získané snímky boli následne analyzované s cieľom detegovať polohu ťažísk jednotlivých markerov. Algoritmus v prvom kroku realizuje konverziu obrazu na binárny tvar [58,59], v prípade potreby aplikuje potlačenie digitálneho šumu [60,61] a využíva funkcie spracovania obrazu [48,50,51]. Na základe matematických výpočtov sú identifikované presné súradnice ťažísk markerov na počiatkovej snímke. Po úspešnej detekcii a validácii algoritmu je táto séria výpočtových operácií aplikovaná sekvenčne na celý obrazový záznam, čo umožňuje kontinuálne sledovať zmeny polôh všetkých bodov v čase.

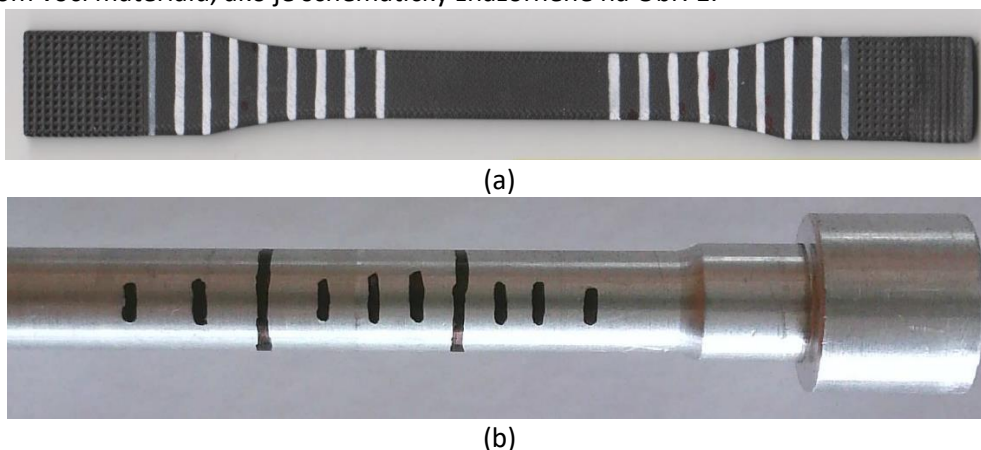
V druhej fáze sa metodika zamerala na experimentálnu validáciu vyvinutého systému. Táto fáza bola realizovaná v dvoch krokoch, pričom prvý krok overoval presnosť systému pri nulovej deformácii vzorky a druhý krok prebiehal už za podmienok reálneho deformačného zaťaženia. Ako referenčná metóda pre posúdenie presnosti navrhnutého riešenia bol zvolený bezkontaktný extenzometer využívajúci digitálnu obrazovú koreláciu (DIC) [79], ktorý sa v súčasnosti považuje za priemyselný a vedecký štandard.

Tretia fáza metodiky prepája získané experimentálne dáta s oblasťou mechaniky kontinua a numerických simulácií. Pre matematický opis polí posunutí a deformácií boli aplikované metódy diskretizácie prostredníctvom jednorozmerných prútových a dvojrozmerných izoparametrických štvoruzlových prvkov [64-68]. Na základe takto stanovených skutočných materiálových charakteristík bol v programe Ansys Workbench zostavený kalibrovaný nelineárny materiálový model s multilineárnym izotrónym spevnením. Správnosť celej navrhutej metodiky bola spätne overená nelineárnou MKP simuláciou, čo umožnilo presné porovnanie a validáciu výsledkov s experimentom.

DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

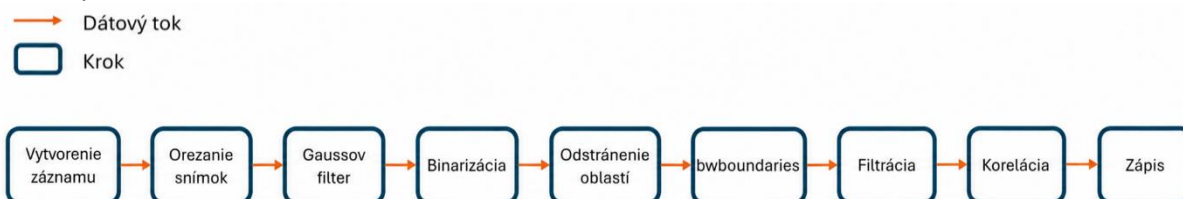
V rámci riešenia dizertačnej práce boli dosiahnuté viaceré významné výsledky, ktoré predstavujú ucelené riešenie problematiky bezkontaktného merania posunutí a budú podrobne špecifikované v nasledujúcich bodoch.

Prvým z dosiahnutých výsledkov je využitie metód počítačového videnia na bezkontaktné merania posunutí, ktoré umožňujú získavať informácie o mechanickom správaní materiálu bez priameho zásahu do skúšobnej vzorky. Tento prístup vychádza zo snímania povrchu vzorky počas zaťažovania, pričom na jej povrch je aplikovaný deterministický vzor vo forme čiar alebo kruhov s dostatočným kontrastom voči materiálu, ako je schematicky znázornené na Obr. 1.

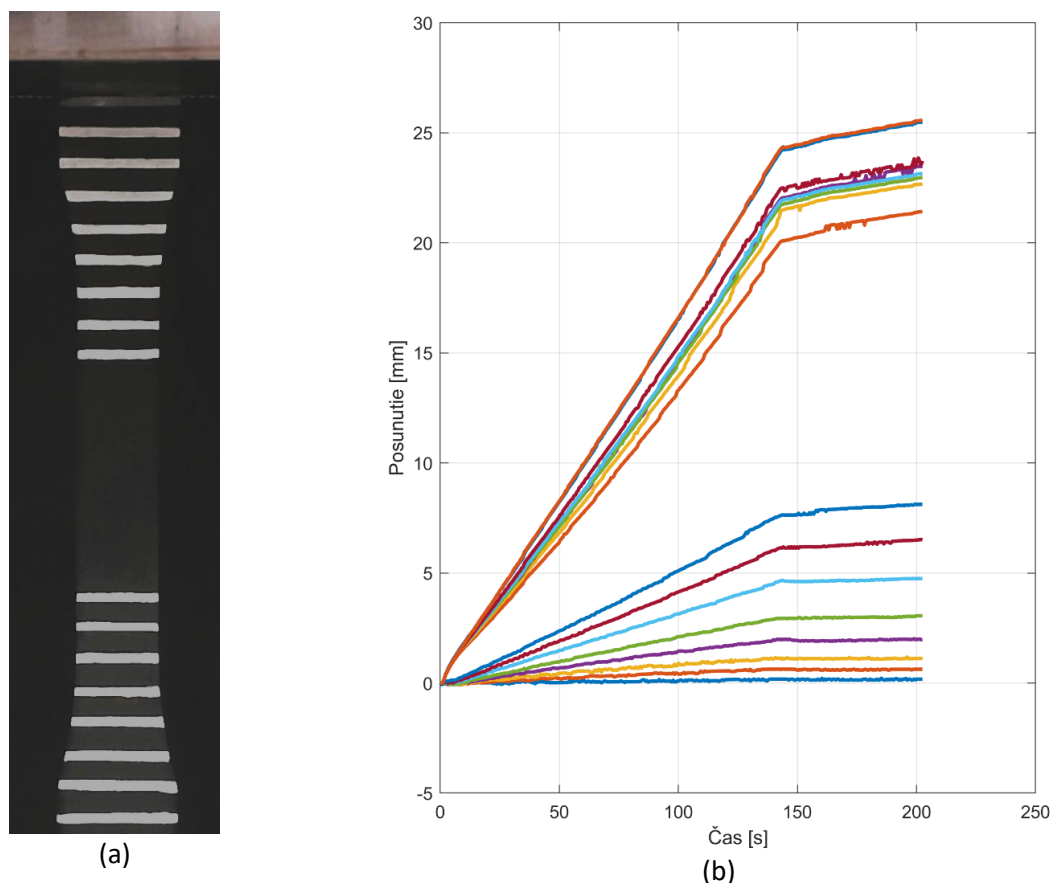


Obr. 1 Povrchová úprava vzoriek: (a) plochá vzorka, (b) kruhová vzorka

Získané obrazové dáta sú následne spracované pomocou segmentácie do binárneho obrazu a detekcie sledovaných objektov, pričom sa využívajú algoritmy na identifikáciu ich hraníc a výpočet ťažísk. Na tento účel bola využitá funkcia *bwboundaries* [50], ktorá umožňuje extrakciu obrysov čiar, a následne sa z polohy týchto objektov určujú ich ťažiská ako základ pre výpočet posunutí. Celý princíp detekcie a výpočtu posunutí je schematicky znázornený na Obr. 2, pričom príklad výsledných posunutí je uvedený na Obr. 3.



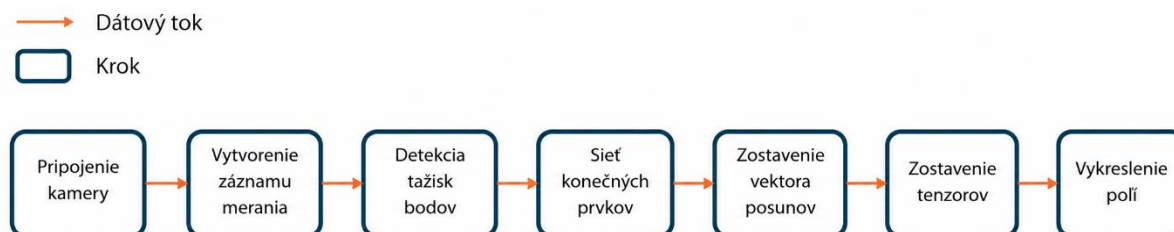
Obr. 2 Pracovný diagram pre detekciu ťažísk



Obr. 3 Priebeh posunutí: (a) vytvorené čiary; (b) namerané posunutia

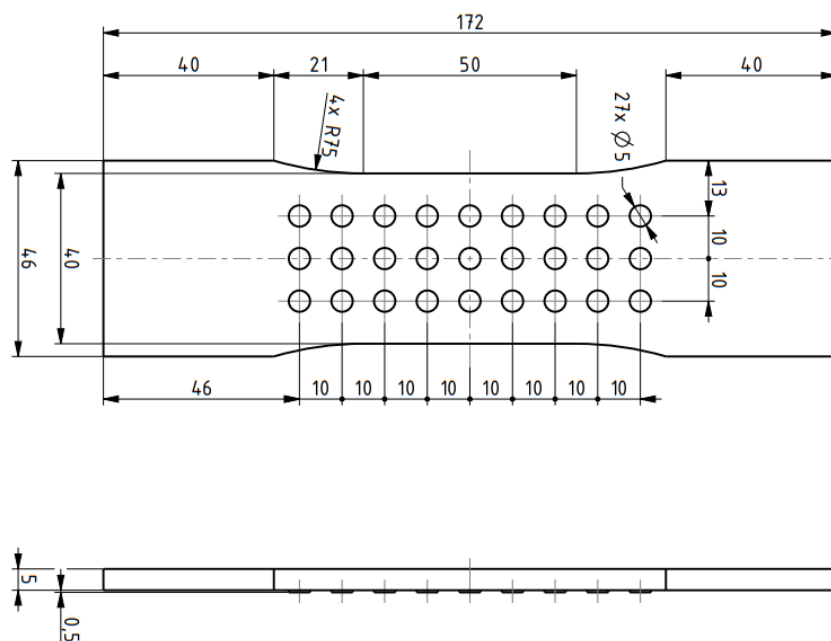
Posunutia sú definované ako rozdiel medzi aktuálnou a počiatočnou polohou ťažísk, pričom pôvodne sú vyjadrené v pixeloch a následne prepočítané na milimetre na základe kalibračnej dĺžky známeho geometrického rozmeru na vzorke. Na elimináciu vplyvu natočenia vzorky a drobných odchýlok snímania sa používa korekcia polohy v smere zaťaženia a korelačná analýza medzi po sebe nasledujúcimi snímkami, ktorá zabezpečuje kontinuitu sledovaných bodov.

Rozšírením tohto prístupu je využitie kruhových markerov, ktoré umožňujú okrem pozdĺžnych aj priečne deformácie, a tým poskytujú komplexnejší opis mechanických vlastností materiálov. V tomto prípade sa detekcia ťažísk realizuje pomocou funkcie *regionprops* s využitím parametra *Centroid*, pričom získané body tvoria vstup pre následnú MKP analýzu. Princíp detekcie a tvorby výpočtového modelu je schematicky znázornený na Obr. 4.



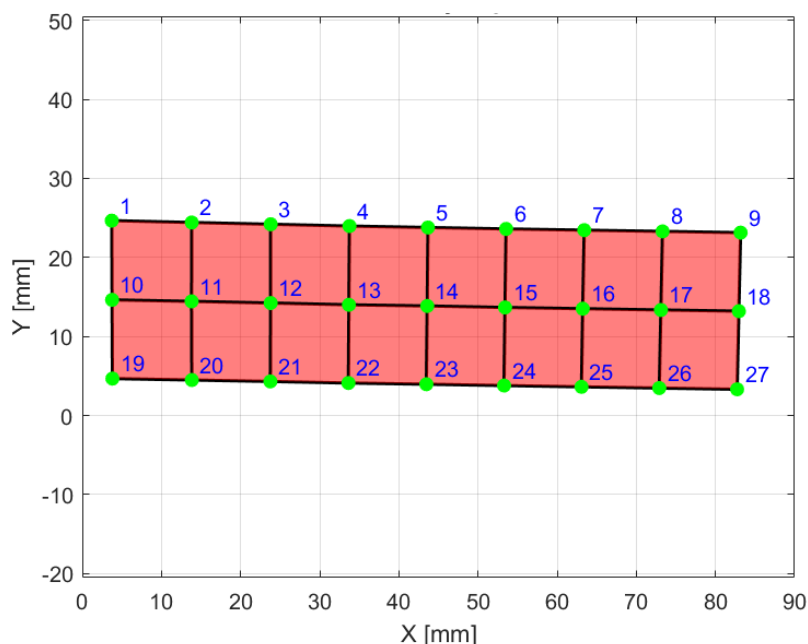
Obr. 4 Pracovný diagram bezkontaktného extenzometra v kombinácii s MKP

Pre merania boli využité modifikované ploché skúšobné vzorky s geometriou vychádzajúcou z normy ASTM D638-14 [1]. Okrem úpravy tvaru boli tiež na povrchu vzorky vytvorené kruhové markery. Tvar a rozmery použitých skúšobných vzoriek sú znázornené na Obr. 5. V tomto prípade boli jednotlivé markery, rovnako ako samotná vzorka, vyhotovené pomocou 3D tlače technológiou FFF.



Obr. 5 Tvar a rozmery modifikovaných plochých skúšobných vzoriek

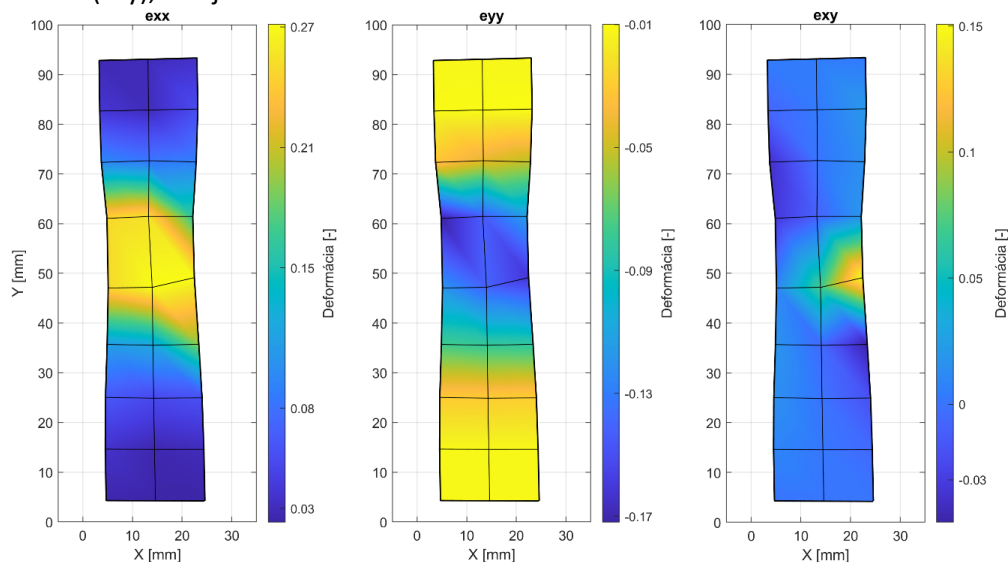
Aplikáciou algoritmov počítačového videnia je možné získať polohy ťažísk jednotlivých markerov na príslušných snímkach. Následne je možné vytvoriť sieť konečných prvkov, pričom ťažiská jednotlivých markerov tvoria uzlové body siete. Sieť konečných prvkov je v tomto prípade tvorená lineárnymi štvoruholníkovými elementami a je zobrazená na Obr. 6, pričom zelenou farbou sú vykreslené uzlové body, spolu s ich číselným označením. Čiernou farbou sú znázornené hranice jednotlivých elementov. Pre lepšiu prehľadnosť sú ešte jednotlivé elementy vyplnené červenou farbou.



Obr. 6 Sieť konečných prvkov

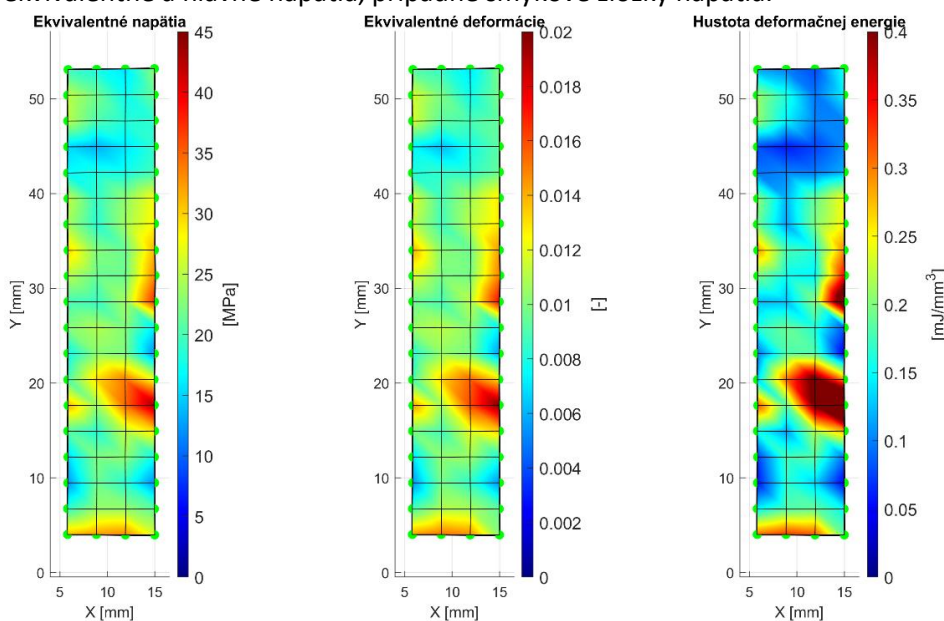
Výpočtový proces je následne založený na predpísaní posunutí jednotlivým uzlom, pričom hodnoty týchto posunutí vychádzajú z detegovaných zmien polohy markerov. Nejde teda o tradičnú aplikáciu MKP, pri ktorej sa rieši úloha silovej rovnováhy. V danom prípade sú využité iba základné princípy metódy, konkrétne výpočet deformácií prostredníctvom derivácií tvarových funkcií. Rovnako je využitý

aj princíp výpočtu napätí, ako aj implementácia materiálového modelu. Takýto prístup umožňuje realizovať výpočet hustoty deformačnej energie, či celkovej deformačnej energie bez potreby fyzického modelovania geometrie riešenej oblasti. Výpočet deformácií je založený na deriváciách tvarových funkcií jednotlivých konečných prvkov, čo umožňuje zostavenie tenzora deformácií podľa známych formulácií v mechanike kontinua. Pre riešenie rovinnú oblasť (Obr. 6) boli následne interpoláciou vizualizované deformačné polia v smere zaťaženia (ϵ_{xx}), kolmo na zaťaženie (ϵ_{yy}) a šmyková zložka (ϵ_{xy}), ako je znázornené na Obr. 7.



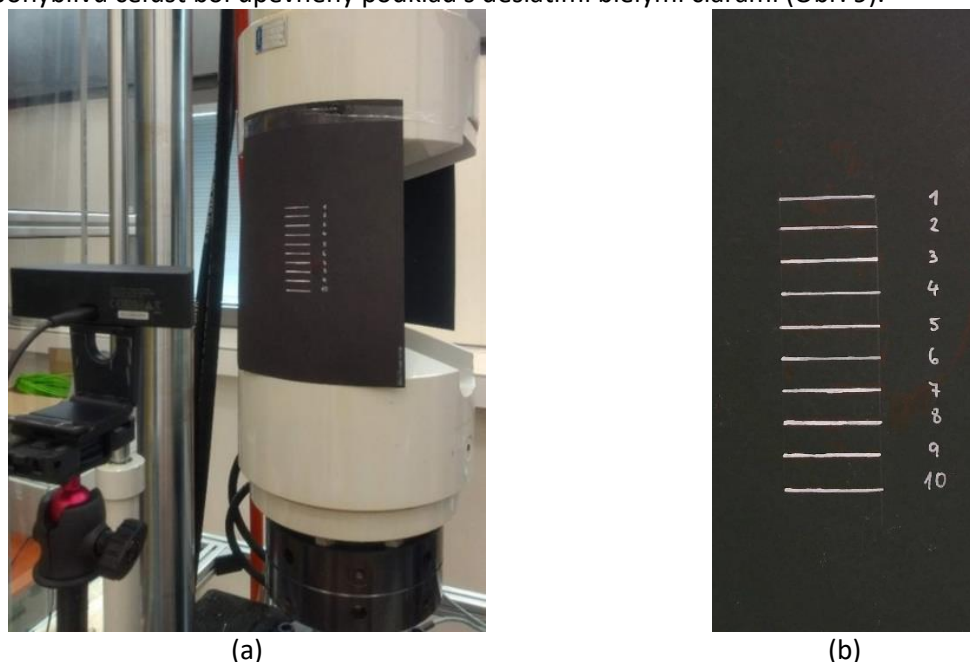
Obr. 7 Deformačné polia

Na obr. 7 sú zobrazené výsledky pre samostatné meranie. Je však potrebné poznamenať, že použitá sieť konečných prvkov má relatívne nízku hustotu, najmä v oblasti koncentrácie deformácií, čo vedie skôr k ilustratívnemu charakteru výsledkov než k presnému lokálnemu zachyteniu gradientov. Z tohto dôvodu sú detailnejšie a presnejšie priebehy deformačných polí prezentované na inom meraní s jemnejšou diskretizáciou, kde je možné lepšie zachytiť lokálne efekty v okolí koncentrácie napätia. V nadväznosti na uvedené sú na príslušných obrázkoch (Obr. 8) taktiež zobrazené ekvivalentné napätia, ekvivalentné deformácie a hustota deformačnej energie, ktoré poskytujú komplexnejší pohľad na rozloženie napäťovo-deformačného stavu v riešenej oblasti. Aplikáciou mechaniky kontinua je možné stanoviť aj ekvivalentné a hlavné napätia, prípadne šmykové zložky napätia.



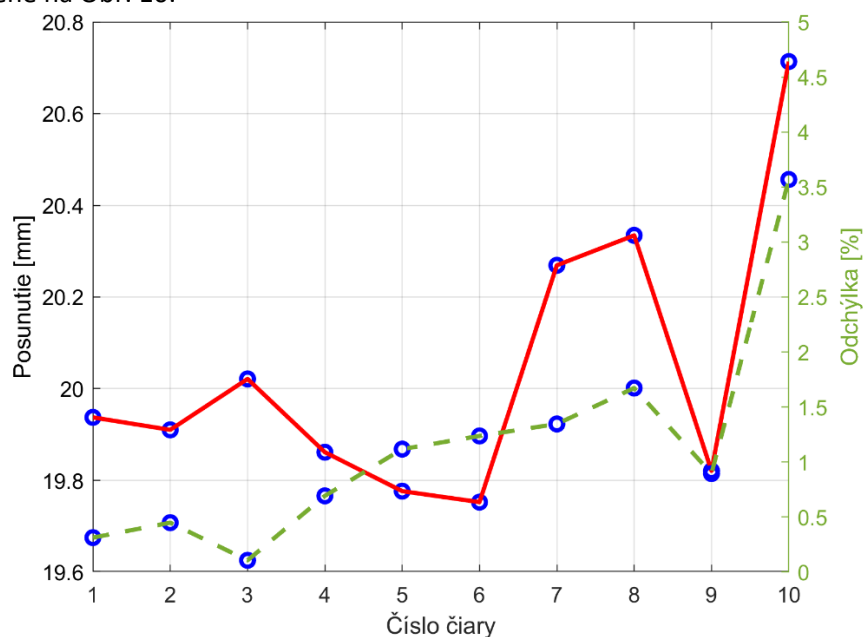
Obr. 8 Zostavené polia deformácií, napätí a hustoty deformačnej energie

Druhým z dosiahnutých výsledkov je overenie a verifikácia vytvoreného prístupu, čo potvrdilo jeho presnosť a vhodnosť ako alternatívy ku komerčným extenzometrom. Verifikácia vytvoreného prístupu bola realizovaná porovnaním výsledkov s experimentálnymi meraniami. V prvom kroku boli vypočítané posunutia porovnané s hodnotami odvodenými z pohybu priečnika skúšobného stroja, pričom deformácia vzorky nebola uvažovaná. Následne boli výsledky porovnané s metódou digitálnej obrazovej korelácie (DIC). Overenie presnosti bez deformácie vzorky bolo realizované na zariadení INOVA – FU-O – 160 – 1260 – V1 pri konštantnej rýchlosti pohybu priečnika a vzdialenosti kamery 300 mm. Na pohyblivú čeľusť bol upevnený podklad s desiatimi bielymi čiarami (Obr. 9).



Obr. 9 Overenie presnosti: (a) priebeh merania; (b) vytvorené biele čiary na čiernom papieri

Keďže boli všetky čiary pevne spojené s pohyblivou časťou, vykazovali identické posunutie. Výsledky preukázali vysokú presnosť prístupu. Pre čiaru v osi kamery bola odchýlka približne 0,23 % (čiara 3), pričom pri ostatných čiarach sa zvyšovala so vzdialenosťou od optickej osi, s maximom približne 3,5 %, ako je zobrazené na Obr. 10.



Obr. 10 Vypočítané posunutia bielych čiar pri vzdialenosti kamery a vzorky 300 mm spolu s vypočítanými odchýlkami celkových posunutí

Druhá časť verifikácie bola zameraná na porovnanie s metódou DIC počas creep skúšok na 20 kN zariadení na vzorkách z materiálu ONYX s 15 referenčnými čiarami. Snímanie prebiehalo kamerou IDS UI – 3180CP [77] s objektívom Computar M3514 – MP F1.4 f = 35 mm [78] a vyhodnotenie DIC bolo realizované v softvéri ALPHA DIC [79]. Priebeh vybraného merania je zobrazený na Obr. 11.



Obr. 11 Priebeh merania

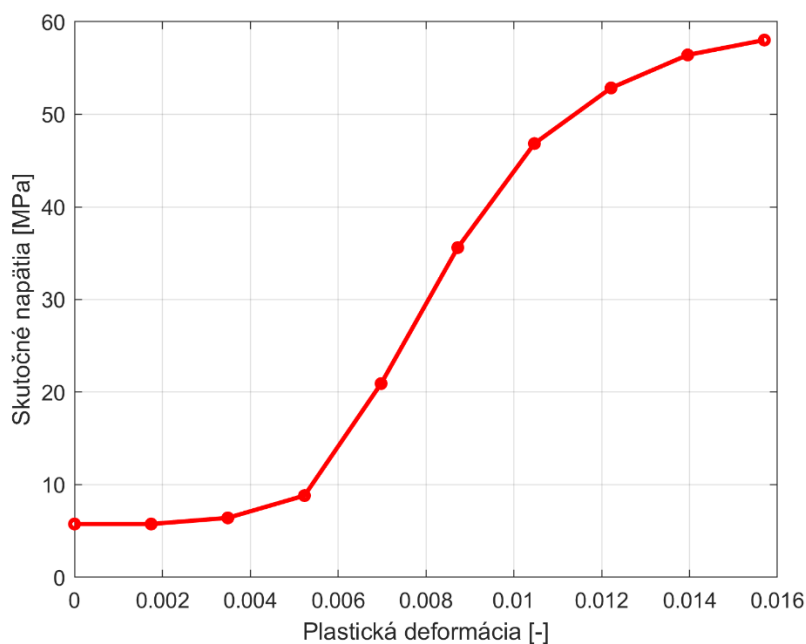
Porovnanie s vytvoreným prístupom preukázalo dobrú zhodu, ako je zobrazené v Tab. 1. Priemerné odchýlky neprekročili 3 %, s výnimkou dvoch prípadov spôsobených nevhodne vytvorenými referenčnými čiarami. Celkovo výsledky potvrdili vysokú presnosť vytvoreného prístupu pri určovaní posunutí.

Tab. 1 Porovnanie priemerných odchýlok pre jednotlivé čiary

Číslo čiary	Priemerná odchýlka [%]
1	2,0670
2	2,0716
3	2,0095
4	2,0979
5	1,5403
6	3,4059
7	2,4897
8	2,3947
9	2,2966
10	4,2866
11	1,6724
12	2,8110
13	2,5913
14	1,5456
15	1,8648

Tretím z dosiahnutých výsledkov bolo využitie bezkontaktného extenzometra na zostavenie napäťovo-deformačnej krivky a identifikáciu materiálového modelu. Materiálový model bol vytvorený na základe

série ťahových skúšok plochých vzoriek vyrobených technológiou FFF. Z obrazových dát boli určené polohy ťažísk jednotlivých čiar, medzi ktorými boli vytvorené prúťové elementy. Na základe zmien ich dĺžok boli vypočítané inžinierske deformácie. V kombinácii s údajmi zo skúšobného stroja bol stanovený Youngov modul pružnosti (3000 MPa), vypočítané inžinierske napätia a následne určené skutočné napätia a deformácie. Získaná napäťovo-deformačná krivka bola transformovaná do tvaru závislosti skutočného napätia od plastickej deformácie, ktorá je vyžadovaná pre implementáciu materiálového modelu v metóde konečných prvkov. Na základe priebehu krivky bol zvolený multilineárny materiálový model, pričom pre zníženie výpočtovej náročnosti bola krivka aproximovaná desiatimi bodmi, ako je zobrazené na Obr. 11 a v Tab. 2.



Obr. 12 Graf skutočných deformácií a napätí

Tab. 2 Vypočítané hodnoty plastickej deformácie a skutočných napätí

Plastická deformácia [-]	Skutočné napätia [MPa]
0	5,757
0,002	5,757
0,003	6,42
0,005	8,691
0,007	22,882
0,009	36,559
0,01	47,023
0,012	52,464
0,014	56,336
0,016	58,02

Správnosť modelu bola overená numerickou simuláciou v prostredí Ansys Workbench. Do výpočtu bola importovaná geometria vzorky spolu s identifikovaným materiálovým modelom. Okrajové podmienky pozostávali z odobratia všetkých stupňov voľnosti na jednej strane vzorky a predpísania experimentálne nameraného posunutia na strane druhej. Výsledkom simulácie bola reakčná sila, ktorá bola následne porovnaná s hodnotami získanými počas experimentálnych meraní.

Realizovaných bolo päť numerických simulácií. Dosiahnuté odchýlky medzi vypočítanými a nameranými silami sa pohybovali v rozsahu 1,88 % až 7,93 %, pričom priemerná odchýlka dosiahla 3,84 %, ako je zobrazené v Tab. 3. Vyššie odchýlky boli pripísané predovšetkým nehomogenite

materiálu vyrobeného technológiou FFF. Napriek tomu výsledky potvrdili, že navrhnutý postup umožňuje identifikovať materiálový model s dostatočnou presnosťou pre jeho využitie v numerických simuláciách.

Tab. 3 Porovnanie reakčnej a nameranej sily

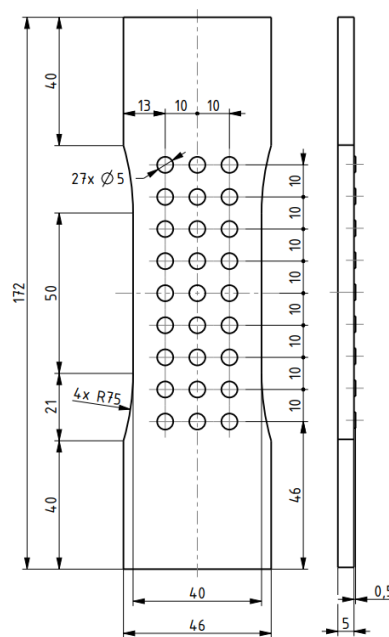
Posunutia [mm] (INOVA)	Sila [N] (INOVA)	Reakčná sila [N] (ANSYS)	Odchýlka reakčnej sily [%]
3,43	1274	1250	1,88
3,29	1287	1185	7,93
3,35	1311	1213	7,48
3	1019	1054	3,43
3,14	1091	1116	2,29

Štvrtým z dosiahnutých výsledkov bolo využitie bezkontaktného extenzometra využívajúceho sériu kruhových markerov na stanovenie Poissonovho čísla. Metóda vychádza z analýzy pozdĺžnych a priečných deformácií v oblasti elastického správania materiálu, pričom elastická oblasť bola uvažovaná do hodnoty deformácie 2,5 %, keďže v tomto intervale sa materiál správal lineárne a nedochádzalo ku vzniku plastickej deformácie.

Na overenie navrhnutého prístupu bola realizovaná séria ťahových skúšok snímaných pomocou webkamery Trust 4K Ultra HD. Pribeh merania je zobrazený na Obr. 13(a). Po spracovaní obrazových dát boli v sledovanej oblasti vytvorené štvoruzlové izoparametrické prvky, pričom ťažiská jednotlivých kruhových markerov boli použité ako uzlové body. Takýto prístup umožnil výpočet pozdĺžnych a priečných deformácií. Na základe ich vzájomného pomeru boli následne vypočítané hodnoty Poissonovho čísla.



(a)



(b)

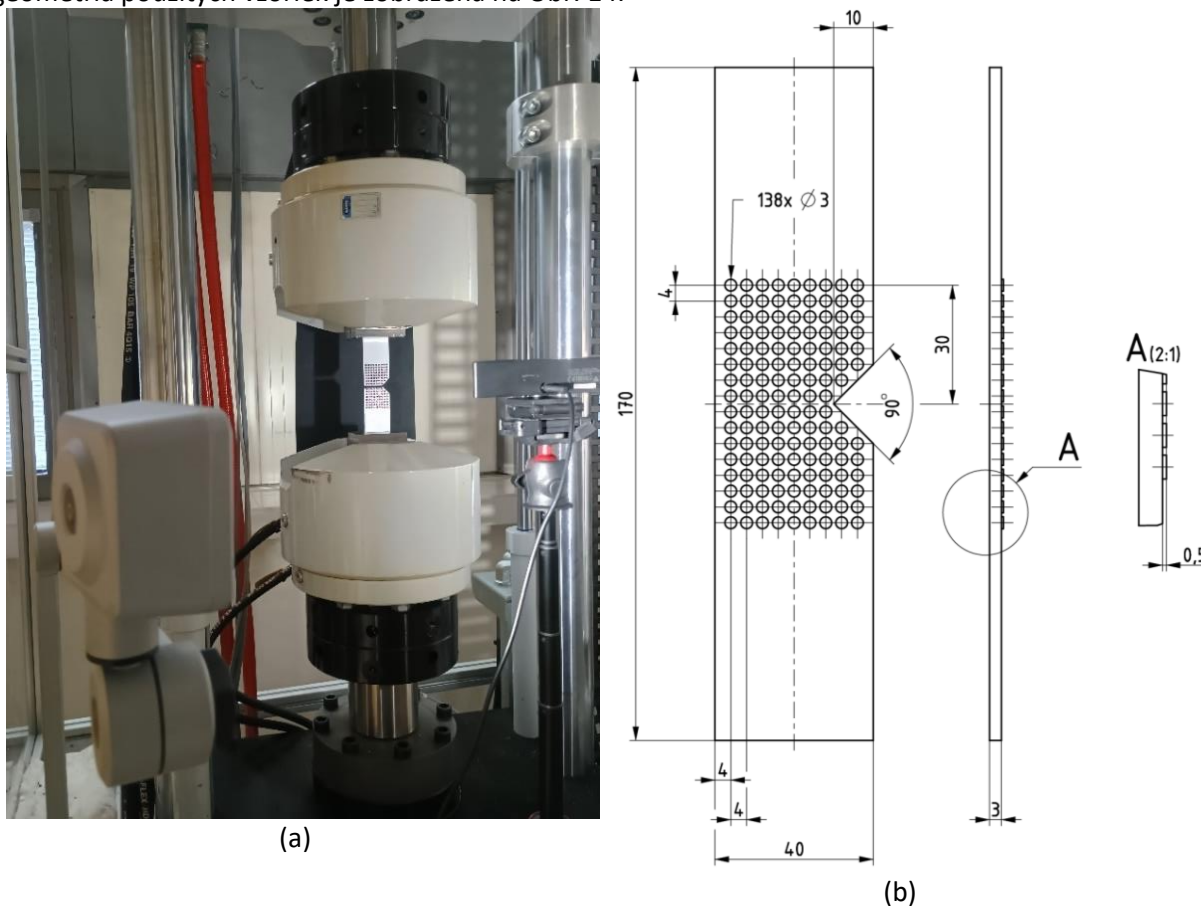
Obr. 13 Snímanie ťahovej skúšky: (a) priebeh merania, (b) tvar a rozmery použitých vzoriek

V prvej sérii meraní boli použité tvarovo modifikované skúšobné vzorky, ktoré mali zvýšiť citlivosť merania priečnej deformácie, ako je zobrazené na Obr. 13 (b). Dve merania poskytli porovnateľné hodnoty Poissonovho čísla (0,40 a 0,41), zatiaľ čo tretie meranie bolo ovplyvnené predčasným porušením vzorky mimo meranej oblasti, čo viedlo k nerealistickému výsledku (0,28). Z uvedeného dôvodu bola realizovaná dodatočná séria meraní na vzorkách podľa normy ASTM D638-14. Vypočítané

hodnoty Poissonovho čísla dosiahli 0,31; 0,29 a 0,26, pričom rozdiely medzi jednotlivými meraniami boli malé a súviseli najmä s prirodzenou variabilitou vzoriek vyrobených technológiou FFF. Dosiahnuté výsledky potvrdili, že navrhnutý bezkontaktný prístup umožňuje spoľahlivé stanovenie Poissonovho čísla na základe analýzy obrazových dát bez potreby použitia špecializovaných meracích zariadení.

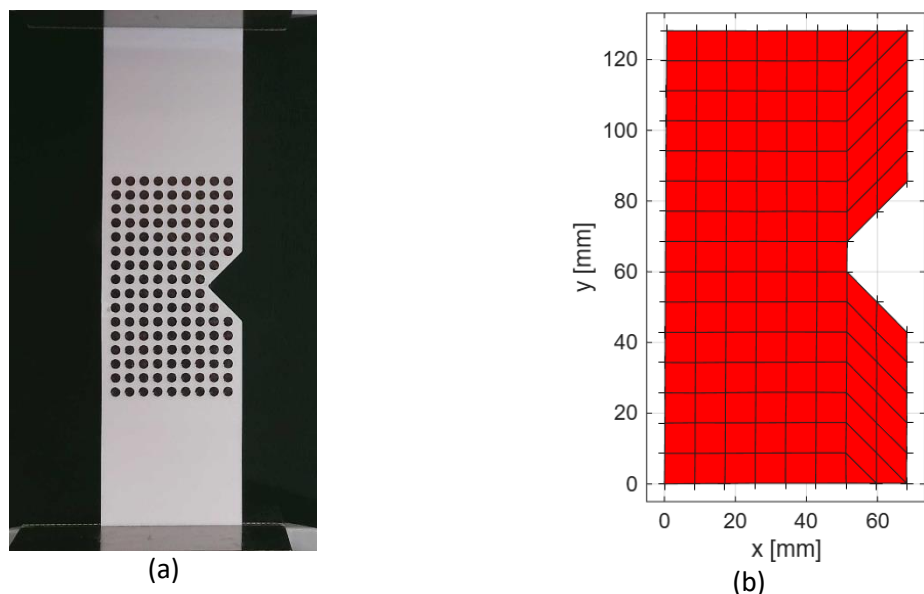
Piatym z dosiahnutých výsledkov bola aplikácia bezkontaktného extenzometra využívajúceho sériu kruhových markerov na analýzu deformačných polí v okolí vrubu a iniciácie trhliny. Tento prístup umožňuje identifikovať lokálne koncentrácie deformácií a sledovať mechanizmus poškodzovania materiálu.

Experimentálne merania boli realizované ťahovými skúškami snímanými webkamerou Trust 4K Ultra HD s frekvenciou 0,1 snímky za sekundu. Použité boli 3D tlačené vzorky z PETG s modifikovanou geometriou umožňujúcou iniciáciu trhliny v strede vzorky. Priebeh vybraného merania, ako aj geometria použitých vzoriek je zobrazená na Obr. 14.



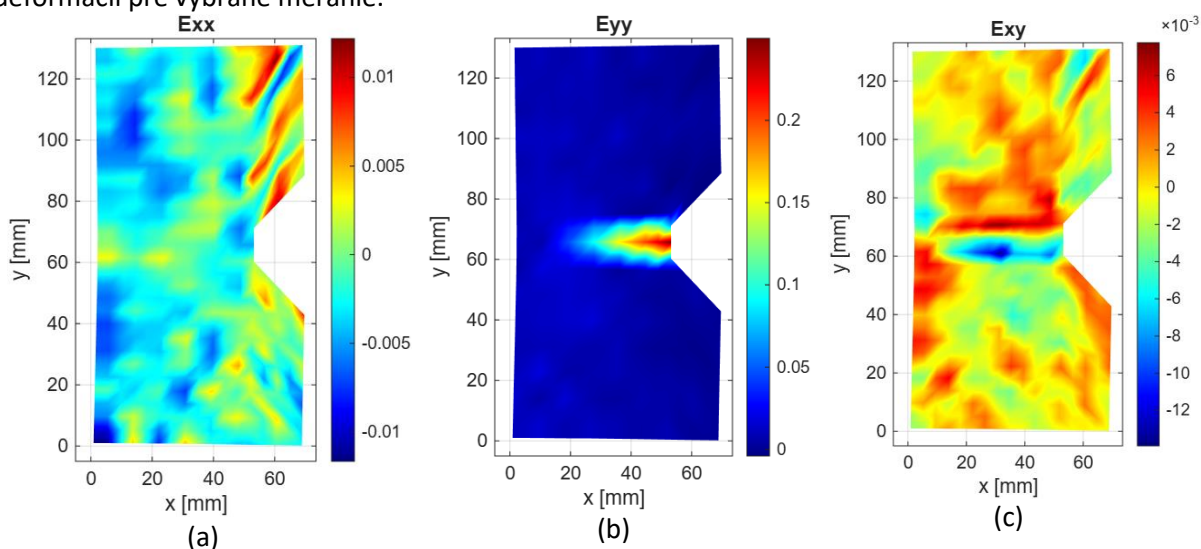
Obr. 14 Meranie posnutí: (a) priebeh merania, (b) tvar a rozmery použitých vzoriek

Ako je možné vidieť na Obr. 14 (b), na povrchu vzoriek bolo vytvorené pole 138 markerov, ktoré slúžili ako miesta záujmu. Rovnako ako v predchádzajúcom prípade, aj v tomto sú ťažiská týchto markerov využité ako uzlové body siete konečných prvkov. Ich rozmiestnenie umožnilo stabilnú detekciu a zároveň tvorbu siete konečných prvkov s najväčším možným počtom štvoruholníkových izoparametrických prvkov a s minimálnym počtom trojuholníkových elementov. Úloha bola riešená ako problém rovinnej napätosti. Vytvorené sieť konečných prvkov je zobrazená na Obr. 15 (b). Pre lepšie porovnanie je na Obr. 15 (a) zobrazená aj prvá snímka z vybraného merania.



Obr. 15 Sieť konečných prvkov: (a) vybraná snímka merania; (b) sieť konečných prvkov

Z posunutí bol následne vypočítaný a zostavený Green-Lagrangeov tenzor deformácií, ktorý umožnil analyzovať ich rozloženie v okolí vrubu a oblasti iniciácie trhliny. Na Obr. 16 sú zobrazené polia deformácií pre vybrané meranie.



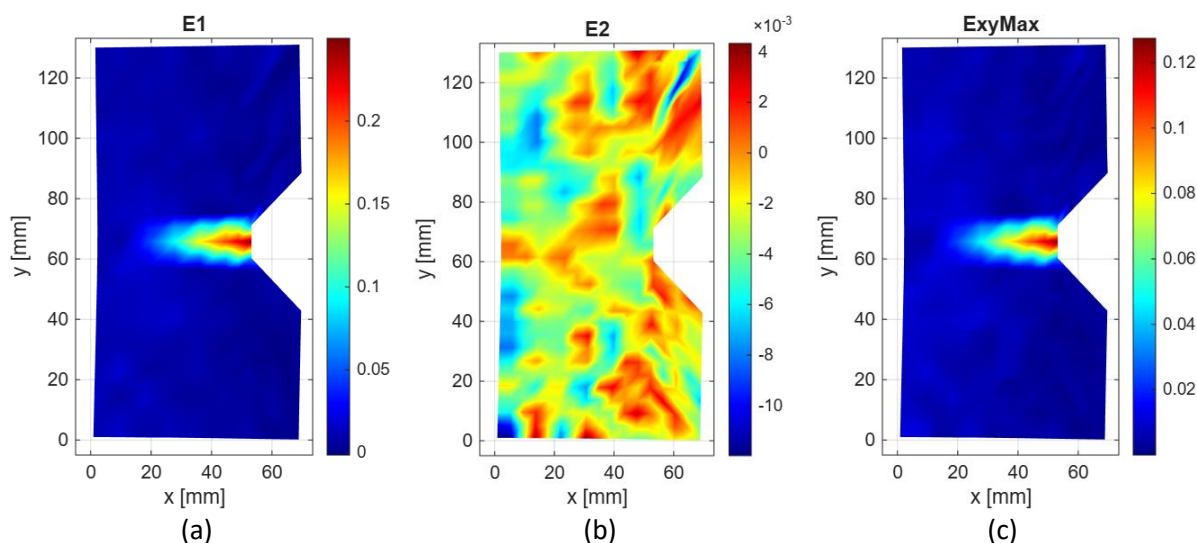
Obr. 16 Výsledné polia deformácií: (a) normálové deformácie v smere osi X; (b) normálové deformácie v smere osi Y; (c) šmykové deformácie

Najvyššie hodnoty deformácií boli zaznamenané v oblasti iniciácie trhliny, čo potvrdzuje vznik lokálnej plastickej zóny a akumuláciu deformačnej energie. Dominantná bola normálová deformácie v smere zaťaženia, osi Y, (na Obr. 16 označené Eyy) zatiaľ čo ostatné zložky deformácie vykazovali výrazne nižšie hodnoty. Maximálne hodnoty deformácií v smere osi Y spolu s ich priemernými hodnotami (M) a smerodajnými odchýlkami (SD) sú uvedené v Tab. 4.

Tab. 4 Maximálne hodnoty deformácií v smere osi Y

Vzorka	1	2	3	4	5	M±D
ε_{yy} [—]	0,25	0,15	0,24	0,22	0,14	0,2±0,05

Ako už bolo uvedené, najvyššie hodnoty deformácie ε_{yy} boli dosiahnuté v smere zaťažovania, teda v smere osi Y. Keďže ide o ťahové namáhanie, dôležitou súčasťou analýzy je aj určenie hlavných deformácií. Na Obr. 17 sú znázornené polia hlavných deformácií pre vybrané meranie.



Obr. 17 Výsledné polia hlavných deformácií: (a) prvé hlavné deformácie; (b) druhé hlavné deformácie; (c) šmykové deformácie

Analýza hlavných deformácií poskytuje detailnejší pohľad na mechanizmus porušenia materiálu v okolí koreňa trhliny. Prvé hlavné deformácie (na Obr. 17 (a) označené E1) vykazujú výraznú koncentráciu v smere zaťaženia, čo potvrdzuje, že iniciácia porušenia je dominantne riadená namáhaním na ťah. Dôležité je však sledovať aj maximálne šmykové deformácie (na Obr. 17 (c) označené ExyMax), ktorých rozloženie poukazuje na vznik plastickej zóny pred čelom trhliny, kde dochádza k intenzívnej akumulácii a disipácii energie. Na základe uvedených výsledkov je preto bližšia pozornosť venovaná najmä prvým hlavným a šmykovým deformáciám, ktorých hodnoty sú zhrnuté v Tab. 5, spolu s ich priemernými hodnotami (M) a smerodajnými odchýlkami (SD).

Tab. 5 Maximálne hodnoty prvých hlavných a šmykových deformácií

Vzorka	1	2	3	4	5	M±D
$\varepsilon_1 [-]$	0,25	0,15	0,24	0,22	0,14	0,2±0,05
$\gamma_{xy} [-]$	0,13	0,09	0,11	0,11	0,08	0,1±0,02

Výsledky uvedené v Tab. 5 potvrdili stabilitu merania medzi jednotlivými vzorkami a ukázali konzistentnú lokalizáciu maximálnych deformácií v oblasti iniciácie trhliny. Navrhnutý prístup tak umožňuje efektívne prepojenie experimentálneho merania posunutí s rovinnou analýzou deformačných polí a ich využitie pre popis mechanizmu šírenia trhliny.

PRÍNOS PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY A PRE PRAX

Prínos pre ďalší rozvoj vedy a pre prax spočíva v komplexnom rozšírení možností experimentálneho a numerického hodnotenia mechanických vlastností materiálov prostredníctvom bezkontaktných metód využívajúcej počítačové videnie. Navrhnutá metodika predstavuje ucelený prístup k meraniu posunutí bez potreby kontaktných snímačov, čím rozširuje existujúce experimentálne postupy o flexibilnú a cenovo dostupnú alternatívu ku komerčným meracím systémom. Zároveň umožňuje jej aplikáciu v rôznych typoch mechanických skúšok, ako sú ťahové skúšky, tečenie materiálu, alebo analýza deformačných polí v oblastiach s koncentráciou napätia, napríklad v okolí trhlín.

Z hľadiska praktického využitia je významným prínosom aj softvérová implementácia vytvorená v prostredí MATLAB, ktorá automatizuje spracovanie obrazových dát, detekciu markerov a výpočet posunutí a deformácií. Na zvýšenie použiteľnosti v technickej praxi bola vyvinutá aj aplikácia v prostredí App Designer, ktorá umožňuje realizáciu meraní aj bez hlbšej znalosti programovania. Tým sa výrazne znižuje obmedzenie prístupu v laboratórnych podmienkach, pričom je možné realizovať merania aj v priemyselných podmienkach. Zároveň je prístup koncepčne prenosný aj do iných programovacích prostredí ako sú napr. Python alebo Octave, čo zvyšuje jeho flexibilitu a potenciál ďalšieho rozvoja v rámci výskumu aj aplikácií.

Dôležitým vedeckým prínosom je prepojenie experimentálne získaných dát s metódou konečných prvkov, ktoré umožňuje nielen určenie vybraných mechanických veličín, ale aj detailnú analýzu rozdelenia deformácií, napätí a ďalších odvodených veličín v skúmanej oblasti. V rámci práce bol zároveň vytvorený a verifikovaný materiálový model vrátane identifikácie jeho parametrov, ktorý bol overený na experimentálnych dátach a preukázal dostatočnú presnosť pre simulácie konštrukčných prvkov z termoplastu PETG.

RESUMÉ

The dissertation thesis focuses on the development of a new type of non-contact extensometer based on computer vision algorithms for the analysis of the mechanical properties of structural materials. The main objective of the work was to develop a cost-effective measuring system capable of accurately determining displacements and strains without physical contact, specialized equipment, or complex surface preparation of test specimens.

The theoretical part of the thesis addresses the principles of computer vision, image processing, and their applications in experimental mechanics. It also includes an overview of selected image analysis algorithms and the fundamentals of the finite element method, with particular emphasis on the integration of experimental data and numerical modeling.

The practical part is devoted to the development of a non-contact measurement methodology, including algorithms for marker detection, displacement evaluation, and strain calculation. The proposed approach was implemented in the MATLAB environment both as a set of scripts and as a standalone application developed using App Designer, enabling measurements to be performed without advanced programming knowledge.

The accuracy of the developed system was verified experimentally. The first series of experiments focused on validating displacement measurements, while the second compared the proposed approach with a commercial non-contact extensometer based on Digital Image Correlation (DIC). The results demonstrated very good agreement, with average deviations not exceeding 3% in most cases. The experimental verification confirmed that the proposed system represents a suitable and economically advantageous alternative to commercially available solutions.

The final part of the thesis presents applications of the developed methodology for the determination of selected mechanical properties of materials. Based on experimentally obtained data, a multilinear material model of PETG thermoplastic was developed and implemented in ANSYS. The model was subsequently verified, with the average deviation between numerical and experimental results remaining below 5%. Furthermore, the proposed methodology was applied to the determination of Poisson's ratio and to the analysis of strain fields in the vicinity of cracks, demonstrating its applicability in fracture mechanics and stress-strain analysis.

The dissertation provides new insights into the application of computer vision methods in experimental mechanics and demonstrates the effective integration of optical measurements with numerical simulations. The result is a versatile and cost-effective system capable of performing non-contact measurements with sufficient accuracy while maintaining low hardware and software requirements.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] ASTM D638-14, (2022), Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics .ASTM International. West Conshohocken.
- [2] ISO 6892-1: 2019, (2019). Metallic materials – Tensile testing. ISO. Geneva. Switzerland.
- [3] Tian, Q. H., Yan, L. P., Yang, T., & Chen, B. Y. (2011). Recent Developments of Material Deformation Measurement. *Applied Mechanics and Materials*, 117-119, 122-128. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.117-119.122>
- [4] Hebert, J., & Khonsari, M. (2023). The application of digital image correlation (DIC) in fatigue experimentation: A review. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 46(4), 1256–1299. <https://doi.org/10.1111/ffe.13931>
- [5] Adak, N. C., Sharma, P., Sardar, H. H., & Neogi, S. (2023). Model Verification and Determination of Temperature-Dependent Mechanical Deformations of Short Glass Fiber/Vinyl Ester Composite by Using Laser Extensometer. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(13), 5862– 5870. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07528-3>
- [6] Tian, L., Yu, L., & Pan, B. (2018). Accuracy enhancement of a video extensometer by real-time error compensation. *Optics and Lasers in Engineering*, 110, 272–278. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.06.010>
- [7] Shao, X., Eisa, M. M., Chen, Z., Dong, S., & He, X. (2016). Self-calibration single-lens 3D video extensometer for high-accuracy and real-time strain measurement, *Optics Express*, 24(26), 30124-30138 <https://doi.org/10.1364/oe.24.030124>
- [8] Buljac, A., Jailin, C., Mendoza, A., Neggers, J., Taillandier-Thomas, T., Bouterf, A., Smaniotto, B., Hild, F., & Roux, S. (2018). Digital Volume Correlation: Review of Progress and challenges. *Experimental Mechanics*, 58(5), 661–708. <https://doi.org/10.1007/s11340-018-0390-7>
- [9] Mousa, M. A., Yussof, M. M., Hussein, T. S., Assi, L. N., & Ghahari, S. A. A (2023). Digital Image Correlation Technique for Laboratory Structural Tests and Applications: A Systematic Literature Review. *Sensors*, 23(23), <https://doi.org/10.3390/s23239362>
- [10] Hassan, G. M. (2020). Deformation measurement in the presence of discontinuities with digital image correlation: A review. *Optics and Lasers in Engineering* 137. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106394>
- [11] Ghari, B., Tourani, A., Shahbahrani, A., & Gaydadjiev, G. (2024). Pedestrian detection in low-light conditions: A comprehensive survey. *Image and Vision Computing*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2024.105106>
- [12] Chen, C., Surette, R., & Shah, M. (2021). Automated monitoring for security camera networks: promise from computer vision labs. *Security*, 34(3), 389–409. <https://doi.org/10.1057/s41284-020-00230-w>
- [13] Wang, H., Salunkhe, O., Quadrini, W., Lämkuhl, D., Ore, F., Despeisse, M., Fumagalli, L., Stahre, J., & Johansson, B. (2024). A systematic literature review of computer vision applications in robotized wire harness assembly. *Advanced Engineering Informatics*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102596>
- [14] Santos, C. A., Costa, C. O., & Batista, J. (2016). A vision-based system for measuring the displacements of large structures: Simultaneous adaptive calibration and full motion estimation

- [15] Rodrigues, A., Figueiredo, L., Diogo, H., & Bordado, J. (2018). Mechanical behavior of PET fibers and textiles for Stent-Grafts using video extensometry and image analysis. *Science and Technology of Materials*, 30, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.11.001>
- [16] Todros, S., Pianigiani, S., de Cesare, N., Pavan, P. G., & Natali, A. N. (2019). Marker Tracking for Local Strain Measurement in Mechanical Testing of Biomedical Materials. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 39(5), 764–772. <https://doi.org/10.1007/s40846-018-0457-z>
- [17] Cosido, O., Iglesias, A., Galvez, A., Catuogno, R., Campi, M., Teran, L., & Sainz, E. (2014). Hybridization of convergent photogrammetry, computer vision, and artificial intelligence for digital documentation of cultural heritage-A case study: The magdalena palace. *Proceedings - 2014 International Conference on Cyberworlds*, 369–376. <https://doi.org/10.1109/CW.2014.58>
- [18] Long, J., Shelhamer, E., & Darrell, T. (2015). Fully convolutional networks for semantic segmentation. *Proceedings – 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVRP)*, 3431–3440. https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2015/papers/Long_Fully_Convolutional_Networks_2015_CVPR_paper.pdf
- [19] Wiley, V., Lucas, T. (2018). Computer Vision and Image Processing: A Paper Review. *International Journal of Artificial Intelligence Research*, 2(1), 22. <https://doi.org/10.29099/ijair.v2i1.42>
- [20] IBM, (2024). What is Computer Vision [online]. 2024 [cit. 2024-07-25]. Dostupné na: <https://www.ibm.com/topics/computer-vision>
- [21] Savioja, L., Ando, A., Duraiswami, R., Habets, E. A. P., & Spors, S. (2015). Introduction to the Issue on Spatial Audio. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing* 9(5), 767–769. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2015.2447112>
- [22] Zai, A. T., Bhargava, S., Mesgarani, N., & Liu, S. C. (2015). Reconstruction of audio waveforms from spike trains of artificial cochlea models. *Frontiers in Neuroscience*, 9(OCT). <https://doi.org/10.3389/fnins.2015.00347>
- [23] Liew, O. W., Chong, P. C. J., Li, B., & Asundi, A. K. (2008). Signature optical cues: Emerging technologies for monitoring plant health. *Sensors*, 8(5), 3205–3239. <https://doi.org/10.3390/s8053205>
- [24] Doulah, A., Farooq, M., Yang, X., Parton, J., McCrory, M. A., Higgins, J. A., & Sazonov, E. (2017). Meal Microstructure Characterization from Sensor-Based Food Intake Detection. *Frontiers in Nutrition*, 4. <https://doi.org/10.3389/fnut.2017.00031>
- [25] Jackman, P., Sun, D. W., Du, C. J., Allen, P., & Downey, G. (2008). Prediction of beef eating quality from colour, marbling and wavelet texture features. *Meat Science*, 80(4), 1273–1281. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.06.001>
- [26] Wu, H., Zhou, Y., Luo, Q., & Basset, M. A. (2016). Training feedforward neural networks using symbiotic organisms search algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*. <https://doi.org/10.1155/2016/9063065>
- [27] Du, C. J., & Sun, D. W. (2005). Pizza sauce spread classification using colour vision and support vector machines. *Journal of Food Engineering*, 66(2), 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.03.011>

- [28] Canny, J. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, (6), 679-698. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4767851>
- [29] Vacchetti, L., Lepetit, V., & Fua, P. (2004). Stable Real-Time 3D Tracking Using Online and Offline Information. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 26(10), 1385-1391. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1323807/authors#authors>
- [30] Yang, W., Ouyang, W., Li, H., & Wang, X. (2016). End-to-End Learning of Deformable Mixture of Parts and Deep Convolutional Neural Networks for Human Pose Estimation. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 3073–3082. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.335>
- [31] Cabessa, J., & Villa, A. E. P. (2014). An attractor-based complexity measurement for boolean recurrent neural networks. *PLoS ONE*, 9(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094204>
- [32] Nandakumar, V., Hansen, N., Glenn, H. L., Han, J. H., Helland, S., Hernandez, K., Senechal, P., Johnson, R. H., Bussey, K. J., & Meldrum, D. R. (2016). Vorinostat differentially alters 3D nuclear structure of cancer and non-cancerous esophageal cells. *Scientific Reports*, (6). <https://doi.org/10.1038/srep30593>
- [33] Siddique, Nazmul., & Adeli, Hojjat. (2013). *Computational Intelligence : Synergies of Fuzzy Logic, Neural Networks and Evolutionary Computing*. Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118534823>
- [34] Kubat, M. (2015). *An Introduction to Machine Learning*. Springer, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-20010-1>
- [35] Spencer, B. F., Hoskere, V., & Narazaki, Y. (2019). Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring. *Engineering*, 5(2), 199–222. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.030>
- [36] Ye, X. W., Yi, T. H., Dong, C. Z., & Liu, T. (2016). Vision-based structural displacement measurement: System performance evaluation and influence factor analysis. *Journal of the International Measurement Confederation*, 88, 372–384. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.01.024>
- [37] Khuc, T., Catbas, F. N., (2016). Computer vision-based displacement and vibration monitoring without using physical target on structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(4), 505-516. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15732479.2016.1164729>
- [38] Dong, X., Lai, M., Liang, H., Wu, P., Wang, C., & Peng, T. (2024). Computer Vision-Based Structural Deformation Monitoring System on Android Smartphones: Design and Implementation. *26th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT)*, 01-06. <https://doi.org/10.23919/ICACT60172.2024.10471940>
- [39] Ye, X. W., Yi, T. H., Dong, C. Z., & Liu, T. (2016). Vision-based structural displacement measurement: System performance evaluation and influence factor analysis. *Journal of the International Measurement Confederation*, 88, 372–384. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.01.024>
- [40] Yu, Z., Shen, G., Zhao, Z., Wu, Z., Liu, Y., & Feng, J. (2024). Transverse Vibration Measurement of Beam Structure Using Based on Subpixel-Based Edge Detection and Point Tracking. *IEEE Sensors Journal*, 24(3), 2671–2681. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3325876>
- [41] viso, (2024). The 12 Most Popular Computer Vision Tools in 2024 [online]. 2024 [cit. 2024-07-25]. Dostupné na: <https://viso.ai/computer-vision/the-most-popular-computer-vision-tools/>

- [42] Medium, (2024). A Guide to Edge Detection and Line Detection in Computer Vision using OpenCV [online]. 2024 [cit. 2024-07-26]. Dostupné na: <https://medium.com/@vipinra79/a-guide-to-edge-detection-and-line-detection-in-computer-vision-using-opencv-dba499b5b4b3>
- [43] Sharma, P., Diwakar, M., Professor, A., & Lal, N. (2013). Edge Detection using Moore Neighborhood. *International Journal of Computer Applications*, 61(3), 26-30. <https://www.ijcaonline.org/archives/volume61/number3/9910-4506/>
- [44] Stern, D., & Kurz, L. (1987). Edge detection in correlated noise using latin square masks. *Pattern Recognition*, 21(2), 119-129. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(88\)90018-0](https://doi.org/10.1016/0031-3203(88)90018-0).
- [45] Kirsch, R. A. (1971). Computer Determination of the Constituent Structure of Bio1ogical Images. *Computers and Biomedical Research*, 4(3), 315-328. [https://doi.org/10.1016/0010-4809\(71\)90034-6](https://doi.org/10.1016/0010-4809(71)90034-6).
- [46] Hueckel, M. H. (1971). An Operator Which Locates Edges in Digitized Pictures. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 18(1), 113-125. <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Operator-Which-Locates-Edges-in-Digitized-Hueckel/0357413d2005fc1da140a3332f0a353354d4b99f>
- [47] Sanger, T. D. (1989). Optimal Unsupervised Learning in a Single-Layer Linear Feedforward Neural Network. *Neural Networks*, 2(6), 459-473. [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90044-0](https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90044-0).
- [48] MathWorks, (2024). Image Processing Toolbox [online]. 2024 [cit. 2024-07-26]. Dostupné na: <https://www.mathworks.com/products/image-processing.html>
- [49] MathWorks, (2024). edge [online]. 2024 [cit. 2024-07-26]. Dostupné na: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/edge.html>
- [50] MathWorks, (2024). bwboundaries [online]. 2024 [cit. 2024-07-26]. Dostupné na: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwboundaries.html>
- [51] Gonzalez, R. C., Woods, R. E. (Richard E., & Eddins, S. L. (2004). *Digital Image processing using MATLAB*. Pearson/Prentice Hall. ISBN 0-13-008519-7. <https://uodiyala.edu.iq/uploads/PDF%20ELIBRARY%20UODIYALA/EL22/Digital%20Image%20Processing%20Using%20Matlab.pdf>
- [52] Gharipour, A., & Liew, A. W. C. (2016). Segmentation of cell nuclei in fluorescence microscopy images: An integrated framework using level set segmentation and touching-cell splitting. *Pattern Recognition*, 58, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.03.030>
- [53] Khodaygan, S. (2014). Manufacturing error compensation based on cutting tool location correction in machining processes. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(11), 969–978. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2013.874580>
- [54] Fogel, I., & Sagi, D. (1989). Biological Cybernetics Gabor Filters as Texture Discriminator. *Biological Cybernetics*, 61, 103-113. <https://doi.org/10.1007/BF00204594>
- [55] Perona, P., & Malik, J. (1990). Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(7), 629-639. <https://doi.org/10.1109/34.56205>
- [56] Jain, A. K. & Farrokhnia, F. (1991). Unsupervised texture segmentation using Gabor filters. *Pattern Recognition*, 24(12), 1167-1186. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(91\)90143-S](https://doi.org/10.1016/0031-3203(91)90143-S).

- [57] Mao, J. & Jain, A. K. (1992). Texture classification and segmentation using multiresolution simultaneous autoregressive models. *Pattern Recognition*, 25(2), 173-188. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(92\)90099-5](https://doi.org/10.1016/0031-3203(92)90099-5).
- [58] MathWorks, (2020). `im2gray` [online]. 2024 [cit. 2024-07-26]. Dostupné na: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/im2gray.html>
- [59] MathWorks, (2024). `im2bw` [online]. 2024 [cit. 2024-07-26]. Dostupné na: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/im2bw.html>
- [60] MathWorks, (2024). `imgaussfilt` [online]. 2024 [cit. 2024-07-26]. Dostupné na: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imgaussfilt.html>
- [61] University of Wisconsin-Madison, (2024). The Gaussian kernel [online]. 2024 [cit. 2024-07-26]. Dostupné na: <https://pages.stat.wisc.edu/~mchung/teaching/MIA/reading/diffusion.gaussian.kernel.pdf.pdf>
- [62] MathWorks, (2024). `imfill` [online]. 2024 [cit. 2024-07-26]. Dostupné na: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imfill.html>
- [63] MathWorks, (2024). `bwareaopen` [online]. 2024 [cit. 2024-07-26]. Dostupné na: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwareaopen.html>
- [64] LAI, W. M., RUBIN, D., KREMPL, E. (1993). *Introduction to Continuum Mechanics*, pp. 1 X. Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford. ISBN 0750628944.
- [65] REDDY, J. N. (2013). *An Introduction to Continuum Mechanics*, Second Edition, pp. 1–X. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 9781107025431.
- [66] Chen, X., Liu, Y.: *Finite Element Modeling and Simulation with Ansys Workbench*. CRC Press, 2015. ISBN 978-1-4398-7385-4
- [67] ANSYS, Inc. *Material Reference*. Release 2020 R2. Canonsburg, PA : ANSYS, Inc., 2020.
- [68] LEE, Huei-Huang. *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2020*. 10. vyd. Mission, KS : SDC Publications, 2020. ISBN 978-1630566159.
- [69] ASTM D3039/D3039M-17, (2017), *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM International. West Conshohocken.
- [70] MathWorks, (2024). `corrcoef` [online]. 2024 [cit. 2024-08-02]. Dostupné na: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/corrcoef.html>
- [71] Piroh, O., Majko, J., Handrik, M., Vaško, M., Cienciala, J., Šofer, M., Fusek, M., & Sága, M. (2025). Rapid and cost-efficient approach for non-contact measurement in experimental mechanics. *Results in Engineering*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105408>
- [72] Ondrej Piroh (2026). *Extenzometer* (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/184138-extenzometer>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved June 25, 2026.
- [73] MathWorks, (2026). *App Designer* [online]. 2026 [cit. 2026-05-26]. Dostupné na: <https://www.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html>

- [74] Majko, J., Piroh, O., Minárik, J., Vaško, M., Handrik, M., Sága, M., & Saternus, Z. (2025). Strain Field Determination for Additively Manufactured Thermoplastics Using Computer Vision. *Manufacturing Technology*, 25(4), 511–520. <https://doi.org/10.21062/mft.2025.060>
- [75] Piroh, O., Minárik, J., Vaško, M., Sága, M., & Majko, J. (n.d.). *Experimental determination of Poisson's ratio using computer vision*. Proceedings of Computational mechanics 2025, 156-159. ISBN 978-80-261-1254-9
- [76] Piroh, O., Minárik, J., Majko, J., Handrik, M., Vaško, M., & Sága, M. *Computer vision-based strain field analysis of 3D printed materials*. Proceedings of the 27th International Conference Applied Mechanics 2026, 115-120. ISBN 978-80-261-1352-2
- [77] IDS, (2025). UI – 2180CP Rev. 2.1 [online]. 2025 [cit. 2026-05-27]. Dostupné na: <https://en.ids-imaging.com/store/ui-3180cp-rev-2-1.html>
- [78] BASLER, (2025). Computar Lens M3514-MP F1.4 f35mm 2/3" [online]. 2025 [cit. 2026-05-27]. Dostupné na: https://www.baslerweb.com/en/shop/computar-lens-m3514-mp-f1-4-f35mm-2-3/?srsId=AfmBOootTWQrbt7XHPdr1w63QZhwQOrq_-yZ-fqyyZuxveOEjbGvwqw-
- [79] XSight, (2025). DIC SOFTWARE MODULES [online]. 2025 [cit. 2026-05-27]. Dostupné na: <https://www.xsight.eu/alpha-digital-image-correlation-software-modules/>
- [80] File, M., Mankovits, T., & Huri, D. (2022). Optical Investigation of the Limits of Modeling the Nonlinear Elastic Behavior of PA6 Using Linear Elastic Material Models. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/app12031057>
- [81] Vaňková, T., Kroupa, T., Zemčík, R., Krystek, J., & Zemčík, H. (2023). Identification of temperature-dependent parameters for an elastic–plastic-damage material model of 3D-printed PETG. *Polymer*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126295>
- [82] Trust, (2024). Trust Teza 4K Ultra HD Webcam [online]. 2024 [cit. 2026-05-27]. Dostupné na: <https://www.trust.com/en/product/24280-teza-4k-ultra-hd-webcam>
- [83] Dupaix, R. B., & Boyce, M. C. (2005). Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(ethylene terephthalate)-glycol (PETG). *Polymer*, 46(13), 4827–4838. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.03.083>
- [84] Majko, J., Sing, S. L., Handrik, M., Piroh, O., Minárik, J., Vaško, M., Sága, M. Failure mechanisms and validity assessment of selected ASTM D638 and D3039 geometries for fused filament fabrication printed composites. *Rapid Prototyping Journal*, [recenzné konanie].
- [85] Gong, K., Lu, Y., Portela, A., & Wei, Q. (2026). Effects of fused filament fabrication parameters on the tensile performances of polyethylene terephthalate-glycol (PETG). *Discover Mechanical Engineering*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s44245-025-00158-8>
- [86] Piroh, O., Minárik, J., Vaško, M., Majko, J., Handrik, M., Sága, M. (2026). Experimental failure analysis of crack initiation using computer vision – based strain field evaluation. *Results in Engineering*. [recenzné konanie].
- [87] Skočovský, P., Bokůvka, O., Konečná, R. & Tillová, E. (2014). *Náuka o materiáli*. EDIS – vydavateľstvo Žilinskej univerzity, 1. ISBN 978-80-554-0871-2.

ZOZNAM PUBLIKOVANÝCH PRÁČ

1. PIROH, O., JAKUBOVIČOVÁ, L., VAŠKO, M., KOPAS, P. 2023. Computer vision as a tool for non – contact deformation measurement. Machine Modelling and Simulations 2023.
2. JAKUBOVIČOVÁ, L., NOVÁK, P., KOPAS, P., PIROH, O. 2023. Finite element analysis of plastic riveted joint of the car's door panel. Machine Modelling and Simulations 2023.
3. PIROH, O., VAŠKO, M., JAKUBOVIČOVÁ, L., HANDRIK, M., MAJKO, J. 2024. Modeling the dynamics of a mooring line using Simscape Multibody. Applied Mechanics 2024. – ISBN 978-80-554-2090-5. -s. 134-138
4. MAJKO, J., VAŠKO, M., PIROH, O., HANDRIK, M., ŠAVRNOCH, Z., MICHAL, P., PAULEC, M. 2024. Suitable approach for arranging fibers for the tensile testing of additively manufactured thermoplastic composites. Applied Mechanics 2024. – ISBN 978-80-554-2090-5. -s. 98-101
5. JAKUBOVIČOVÁ, L., VAŠKO, M., PIROH, O., SYNÁK, F. 2024. Simplified FEM model of the aluminum Bosh rexroth profile. Applied Mechanics 2024. – ISBN 978-80-554-2090-5. -s. 62-67
6. HANDRIK, M., VAŠKO, M., MAJKO, J., PIROH, O. 2024. MATLAB-ADINA coupling for finite element analysis. Applied Mechanics 2024. – ISBN 978-80-554-2090-5. -s. 205 – 237
7. MAJKO, J., HANDRIK, M., VAŠKO, M., PIROH, O., VAŠKO, A. 2024. Effect of V-notch on impact toughness of fibre reinforced laminates produced by FFF method.. Engineering Failure Analysis, 165, 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108717>
8. PIROH, O., MAJKO, J., HANDRIK, M., VAŠKO, M., CIENCIALA, J., ŠOFER, M., FUSEK M., & SÁGA, M. 2025. Rapid and cost-efficient approach for non-contact measurement in experimental mechanics. Results in Engineering, 26. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105408>
9. MAJKO, J., PIROH, O., MINÁRIK, J., VAŠKO, M., HANDRIK, M., SÁGA, M., & SATERNUS, Z. 2025. Strain Field Determination for Additively Manufactured Thermoplastics Using Computer Vision. Manufacturing Technology, 25(4), 511-520. <https://doi.org/10.21062/mft.2025.060>
10. PIROH, O., MINÁRIK, J., VAŠKO, M., SÁGA, M., & MAJKO, J. 2025. Experimental determination of Poisson's ratio using computer vision. Proceedings of Computational mechanics 2025, 156 – 159. ISBN 978-80-261-1254-9
11. PIROH, O., MINÁRIK, J., MAJKO, J., HANDRIK, M., VAŠKO, M., & SÁGA, M. 2026. . Computer vision-based strain field analysis of 3D printed materials. Proceedings of the 27th International Conference Applied Mechanics 2026, 115-120. ISBN 978-80-261-1352-2
12. JAKUBOVIČOVÁ, L., PIROH, O., VAŠKO, M., & SÁGA, M. 2024. Návrh unikátneho jednéhoúčelového zariadenia pre skúšky tečenia. Techhnológ, 16(4), 51-57. <https://doi.org/10.26552/tech.C.2024.4.8>
13. PIROH, O., MAJKO, J., HANDRIK, M., VAŠKO, M., FUSEK, M., ŠOFER, M., CIENCIALA, J., & SÁGA, M. 2026. Comparison of a non-contact extensometer using image analysis and digital image correlation for non-contact displacement measurement. Transportation Research Procedia, 93, 334-339. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.11.051>

14. MAJKO, J., DEGANOVÁ, L., PIROH, O., MINÁRIK, J. 2025. Porovnanie optimalizačných algoritmov pri spektrálnom ladení mechanickej sústavy. *Technológ*, 17(4), 43-47. <https://doi.org/10.26552/tech>
15. HANDRIK, M., MAJKO, J., PIROH, O. 2024. Modelovanie a výpočty metódou konečných prvkov: riešené príklady v Ansys Workbench. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 312s. ISBN 978-80-554-2125-4
16. PIROH, O., VAŠKO, M., HANDRIK, M., MAJKO, J., CHALUPOVÁ, M., & SÁGA, M. 2025. Using image analysis to detect heat treatment of microstructures. *Applied mechanics* 2025, 98-101. ISBN 978-80-87434-11-6.
17. MAJKO, J., PIROH, O., HANDRIK, M., VAŠKO, M., SÁGA, M. 2025. ASTM/ISO 52924 and tensile testing of 3D printed composites. *Applied mechanics* 2025, 74-77. ISBN 978-80-87434-11-6.
18. MAJKO, J., VAŠKO, M., HANDRIK, M., PIROH, O., SÁGA, M., PIJÁKOVÁ, K. 2024. Concerns in tensile testing of thermoplastic composites produced by FFF method. *Computational Mechanics* 2024, 83-85. ISBN 978-80-261-1249-5.
19. SAPIETOVÁ, A., PIROH, O., DEGANOVÁ, L., SAPIETA, M. 2025. Multisoftware synthesis of kinematic parameters MBS. *Applied mechanics* 2025, 106-109. ISBN 978-80-87434-11-6.
20. MINÁRIK, J., SÁGA, M., VAŠKO, M., PIROH, O. 2025. Contribution to the numerical analysis of a wave propagation through a nonlinear elastic environment. *Proceedings of Computational mechanics* 2025, 128-131. ISBN 978-80-261-1254-9.
21. VAŠKO, M., PIROH, O., HANDRIK, M., MAJKO, J. 2024. *Applied mechanics 2024: book of articles*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 242s. ISBN 978-80-554-2090-5.
22. JAKUBOVIČOVÁ, L., PIROH, O., VAŠKO, M. 2025. Methodology for evaluating experimental data obtained from creep tests. *Applied mechanics* 2025, 50-53. ISBN 978-80-87434-11-6.
23. PIROH, O., MINÁRIK, J., VAŠKO, M., MAJKO, J., HANDRIK, M., SÁGA, M. 2026. Experimental failure analysis of crack initiation using computer vision – based strain field evaluation. *Results in Engineering*. [recenzné konanie].
24. MAJKO, J., SING, S. L., HANDRIK, M., PIROH, O., MINÁRIK, J., VAŠKO, M., SÁGA, M. 2026. Failure mechanisms and validity assessment of selected ASTM D638 and D3039 geometries for fused filament fabrication printed composites. *Rapid Prototyping Journal*, [recenzné konanie].