

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2026

Ing. Lucia Deganová



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Lucia Deganová

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**Hodnotenie defektov v konštrukčných materiáloch pomocou infračervenej termografie s využitím
neurónových sietí.**

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. Lucia Deganová
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra aplikovanej mechaniky

Školiteľ: doc. Ing. Vladimír Dekýš, CSc.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra aplikovanej mechaniky

Oponenti:

1. Milan Honner, prof., Ing., Ph.D.
Nové technológie – výskumné centrum
Západočeská univerzita v Plzni
2. Martin Fusek, prof., Ing., Ph.D.
Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojná
Katedra aplikovanej mechaniky
3. Peter Frankovský, prof., Ing., PhD.
Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta,
Katedra aplikovanej mechaniky a strojného inžinierstva

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 20.08.2026 o 9:00 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

Nedeštruktívne testovanie (NDT) predstavuje nevyhnutnú súčasť moderného priemyslu, v ktorom je potrebná kontrola kvality, spoľahlivosti a bezpečnosti komponentov bez ich poškodenia. Existuje množstvo techník nedeštruktívneho testovania, medzi ktoré patrí napríklad ultrazvukové, magnetické či röntgenové testovanie. Jednou z metód, ktorá sa v súčasnosti dostáva výrazne do popredia, je infračervené nedeštruktívne testovanie. Táto technológia využíva princípy infračervenej termografie, pri ktorej je testovaný objekt budený pomocou excitačného zdroja a jeho odozva je zaznamenaná infračervenou kamerou. Infračervené testovanie poskytuje bezkontaktnú a rýchlu analýzu povrchových aj podpovrchových defektov, ako sú napríklad trhliny, delaminácie, dutiny alebo iné vnútorné nehomogenity materiálu.

V posledných rokoch sa výrazne rozvíja aj aditívna výroba, najmä technológia Fused Deposition Modeling (FDM), ktorá umožňuje rýchlu a flexibilnú výrobu prototypov, funkčných dielov a komponentov s komplexnou geometriou. Výhodou tejto technológie je možnosť výroby tvarovo zložitých štruktúr pri relatívne nízkom množstve odpadu a pri vysokej miere prispôsobenia konkrétnej aplikácii. Pomocou FDM technológie je možné spracovávať nielen čisté polymérne materiály, ale aj kompozitné materiály vystužené krátkymi uhlíkovými vláknami, kontinuálnymi uhlíkovými vláknami alebo sklenenými vláknami.

Okrem potreby spoľahlivého testovania sa moderný priemysel neustále zameriava na zefektívnenie výroby, minimalizáciu chýb a automatizáciu vyhodnocovacích procesov. Tieto požiadavky podporujú využitie metód umelej inteligencie, ktoré umožňujú analyzovať a vyhodnocovať rozsiahle experimentálne dáta.

Predkladaná dizertačná práca sa v praktickej časti zameriava na hodnotenie defektov v aditívne vyrábaných polymérnych a kompozitných materiáloch pomocou pulznej infračervenej termografie. V rámci práce bol v prostredí MATLAB navrhnutý a implementovaný postup automatizovaného spracovania termografických sekvencií, ktorý zahŕňa výpočet teplotných a kontrastných kriviek, adaptívne určenie časového intervalu, TSR aproximáciu a hodnotenie čitateľnosti defektov pomocou metriky CNR. Význam navrhnutého prístupu spočíva v prepojení experimentálneho merania, automatizovaného spracovania dát, redukcie rozsiahlych termografických sekvencií na kompaktný vektor vstupných príznakov a ich následnom využití v regresnom modeli. Takto spracované údaje zachovávajú relevantnú informáciu o tepelnej odozve defektu, pričom umožňujú pracovať s podstatne menším súborom dát ako pri priamom spracovaní celých termografických sekvencií.

STRUČNÝ PREHĽAD PROBLEMATIKY

V posledných rokoch sa výrazne rozvíja aditívna výroba, najmä technológia Fused Deposition Modeling (FDM), ktorá umožňuje rýchlu a flexibilnú výrobu prototypov, funkčných dielov a komponentov s komplexnou geometriou. Výhodou tejto technológie je možnosť výroby tvarovo zložitých štruktúr pri relatívne nízkom množstve odpadu a pri vysokej miere prispôsobenia konkrétnej aplikácii. Pomocou FDM technológie je možné spracovávať nielen čisté polymérne materiály, ale aj kompozitné materiály vystužené krátkymi uhlíkovými vláknami, kontinuálnymi uhlíkovými vláknami alebo sklenenými vláknami [60].

Komponenty vyrobené technológiou FDM môžu napriek výhodám aditívnej výroby obsahovať vnútorné alebo povrchové defekty. Ich vznik súvisí najmä s vrstveným charakterom výroby, tepelným cyklom počas nanášania materiálu a nastavením procesných parametrov tlače. Tieto defekty môžu mať nepriaznivý vplyv na integritu komponentu a jeho mechanické vlastnosti [65], [66].

Nedeštruktívne testovanie predstavuje nevyhnutnú súčasť moderného priemyslu, v ktorom je potrebná kontrola kvality, spoľahlivosti a bezpečnosti komponentov bez ich poškodenia. Jednou z metód, ktorá sa v súčasnosti dostáva výrazne do popredia, je infračervené nedeštruktívne testovanie. Táto technológia využíva princípy infračervenej termografie, pri ktorej je testovaný objekt budený pomocou excitačného zdroja a jeho odozva je zaznamenaná infračervenou kamerou. Infračervené testovanie poskytuje bezkontaktnú a rýchlu analýzu povrchových aj podpovrchových defektov.

Pri aktívnej termografii môže byť meranie realizované v reflexnom alebo transmisnom usporiadaní. Pri reflexnom usporiadaní sa zdroj excitácie aj infračervená kamera nachádzajú na rovnakej strane objektu, zatiaľ čo pri transmisnom usporiadaní je zdroj excitácie umiestnený na opačnej strane objektu vzhľadom na infračervenú kameru. Reflexné usporiadanie má významné praktické uplatnenie pri hodnotení reálnych technických komponentov, pretože v priemyselných aplikáciách sú skúšané komponenty často prístupné iba z jednej strany. Zároveň sa pri tomto usporiadaní spravidla dosahuje vyšší kontrast defektov, najmä pri plytko uložených defektoch [5], [6], [46], [47].

Výber vhodného spôsobu tepelného budenia a usporiadania meracej zostavy závisí od konkrétneho materiálu, typu defektu a požadovaného spôsobu vyhodnotenia. V odbornej literatúre sú termografické metódy využívané aj pri hodnotení materiálov používaných v leteckom priemysle, najmä pri CFRP a honeycomb štruktúrach. Práve v aplikáciách, kde sa kladie dôraz na bezpečnosť a spoľahlivosť komponentov, má nedeštruktívne hodnotenie defektov zásadný význam. [12]

TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Cieľom dizertačnej práce je výber optimálnej metódy hodnotenia defektov pomocou NDT (infračervenej termografie) s využitím neurónovej siete.

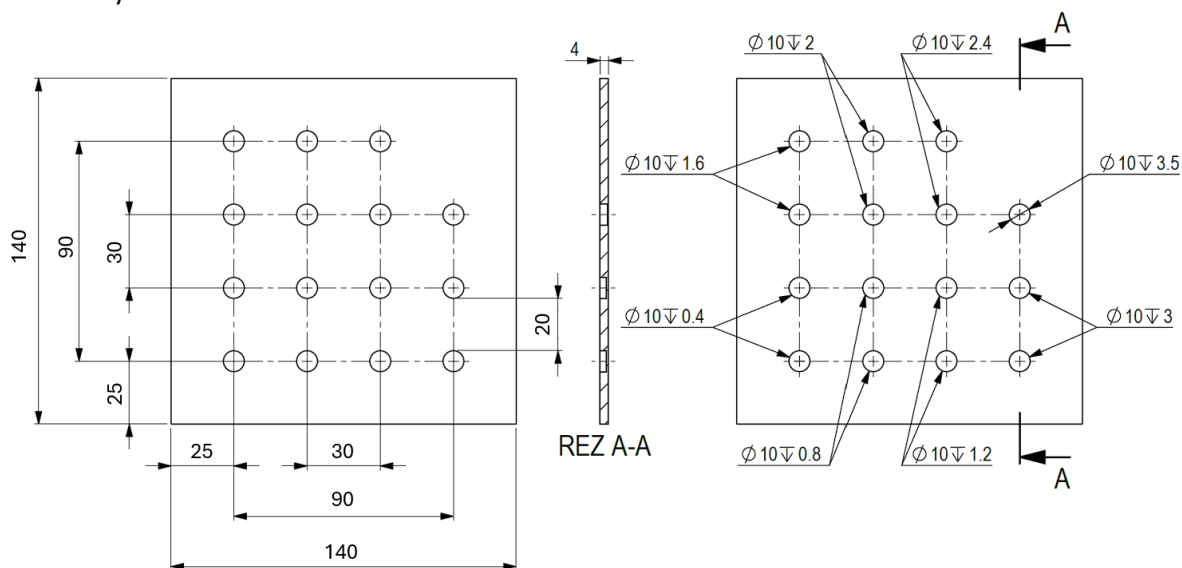
Na splnenie hlavného cieľa boli stanovené nasledujúce čiastkové ciele:

- Navrhnuť optimálnu experimentálnu konfiguráciu infračervenej termografie vrátane výberu vhodného zdroja externého budenia.
- Aplikovať post-processingovú metódu na zvýšenie presnosti detekcie defektov a redukciu šumu v termografických snímkach.
- Vyhodnotiť najvhodnejšiu metódu na základe typu materiálu a charakteru defektov.
- Navrhnuť a vytrénovať neurónovú sieť na automatickú klasifikáciu defektov.

ZVOLENÉ METÓDY SPRACOVANIA

1.1 Skúmané materiály a skúšobné vzorky

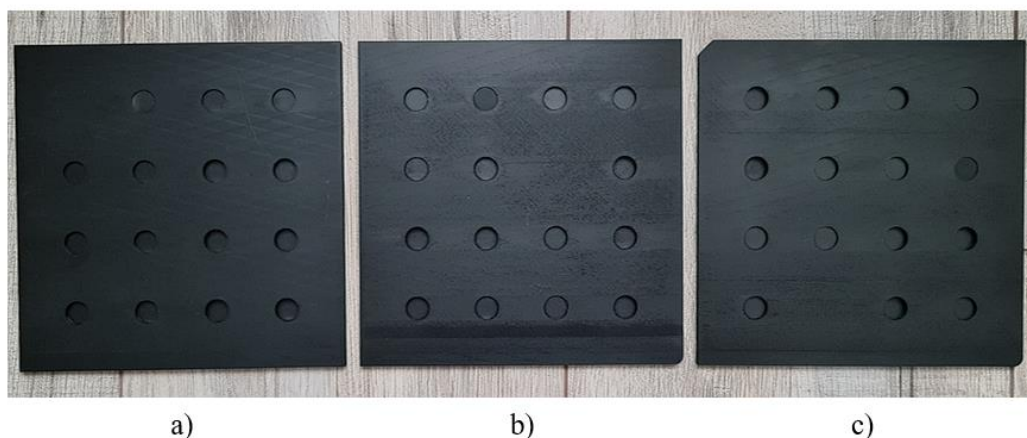
V experimentálnej časti boli skúmané aditívne vyrábané polymérne a kompozitné materiály PLA, PET-G, PET-G HF a Onyx. Skúšobné vzorky boli navrhnuté ako rovinné dosky s umelo vytvorenými podpovrchovými defektmi typu Flat-Bottom Hole. Rozmery vzorky z materiálu PLA spolu so zakótovaným rozmiestnením defektov sú znázornené na Obr. 1.



Obr. 1 Rozmery skúšobnej vzorky z materiálu PLA s vyznačením defektov typu Flat-Bottom Hole

Pre ostatné skúmané materiály boli z dôvodu rozmerového obmedzenia tlačovej podložky a časovej náročnosti tlače vyhotovené vzorky s rozmermi 132 × 132 × 4 mm.

Vzorky boli pripravené v troch geometrických variantoch. Geometria g3 (Obr.2a) predstavovala usporiadanie s lineárnym nárastom nominálnej hĺbky defektov. Geometrie g4 (Obr.2b) a g5 (Obr.2c) obsahovali rovnaké nominálne hĺbky defektov ako geometria g3, avšak s náhodným priestorovým rozložením. Takto navrhnuté vzorky umožnili hodnotiť termografickú odozvu defektov pri rôznych hĺbkach, materiáloch a priestorovom rozmiestnení defektov. Reálne vyhotovenie PLA vzoriek v troch geometrických variantoch je znázornené na Obr. 2.



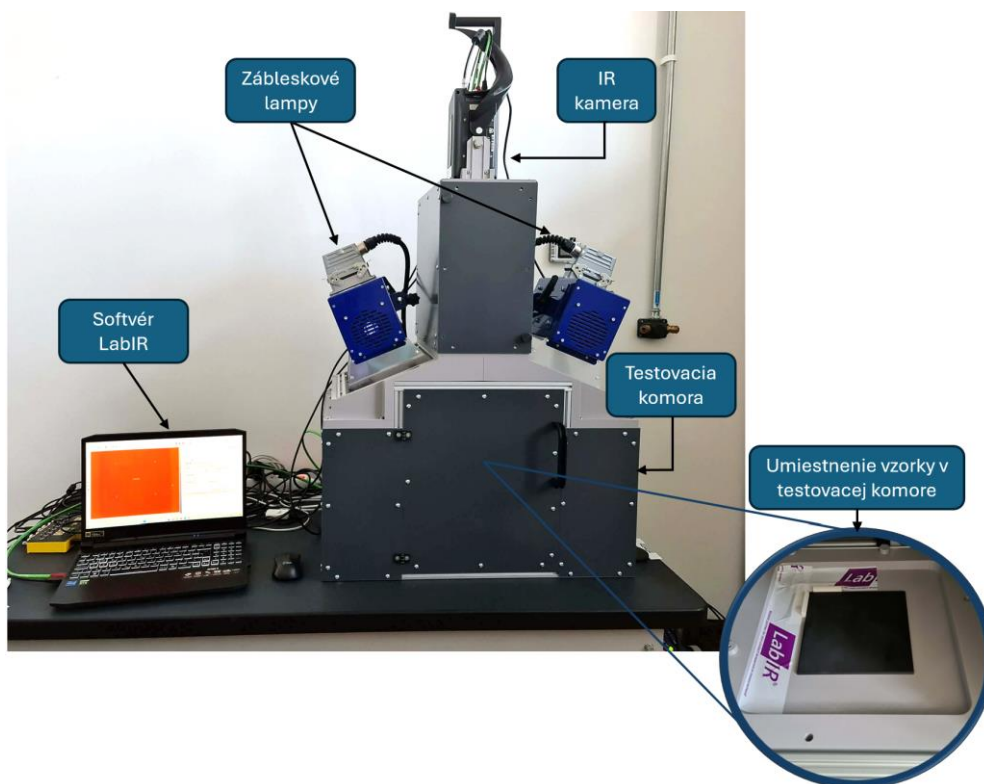
Obr. 2 Skúšobné vzorky z materiálu PLA; a) g3, b) g4, c) g5

1.2 Experimentálne meranie pulznou termografiou

Na hodnotenie defektov v skúšobných vzorkách bola použitá pulzná optická infračervená termografia. V porovnaní s ultrazvukovým budením ide o nekontaktnú metódu, pri ktorej je vzorka budená krátkym

tepelným impulzom zo zábleskových lúčov. Tento prístup umožňuje analyzovať časový priebeh tepelnej odozvy jednotlivých defektov a zároveň eliminuje riziko mechanického poškodenia povrchu vzorky.

Meranie bolo realizované v reflexnom usporiadaní, pri ktorom sa infračervená kamera aj zdroje tepelného budenia nachádzali na rovnakej strane skúšobnej vzorky. Vzorka bola počas merania budená dvojicou zábleskových lúčov a časový vývoj povrchovej teploty bol zaznamenávaný infračervenou kamerou. Reflexné usporiadanie experimentálnej zostavy je znázornené na Obr. 3.



Obr. 3 Reflexné usporiadanie experimentálnej zostavy

Pre každú vzorku boli realizované merania pri štyroch natočeniach, a to 0° , 90° , 180° a 270° . Takýto postup umožnil získať viacnásobné merania jednotlivých oblastí defektov a zohľadniť vplyv orientácie vzorky voči zdrojom tepelného budenia a snímaciemu systému. Získané termografické sekvencie tvorili vstupné dáta pre následné spracovanie v prostredí MATLAB.

1.3 Experimentálne stanovenie efektívnej tepelnej difuzivity

Samostatnou časťou experimentálneho riešenia bolo stanovenie efektívnej tepelnej difuzivity skúmaných materiálov pomocou Parkerovej metódy. Meranie bolo realizované na samostatných vzorkách materiálov PLA, PET-G, PET-G HF a Onyx. Cieľom tohto merania bolo získať materiálovú charakteristiku potrebnú na porovnanie rozdielneho tepelného správania skúmaných materiálov pri pulznom tepelnom budení. Experimentálne usporiadanie použité pri stanovení tepelnej difuzivity je znázornené na Obr. 4.



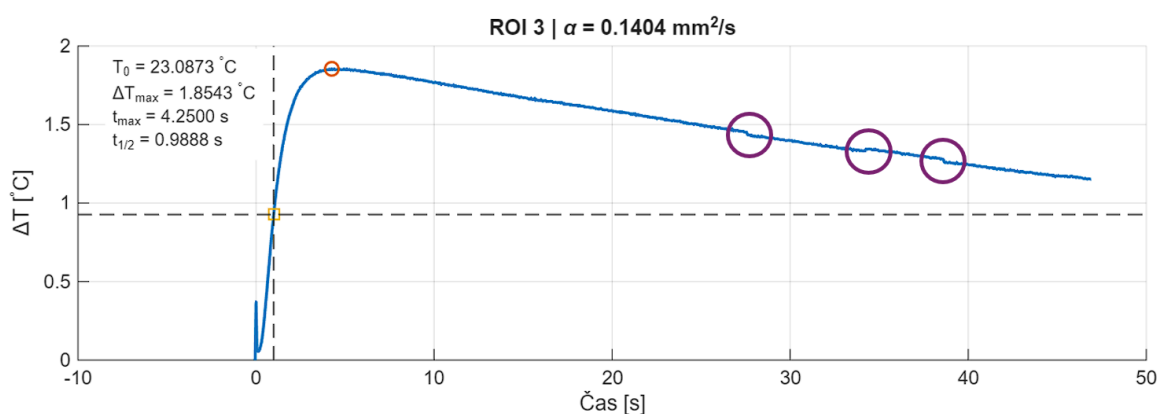
Obr. 4 Usporiadanie meracej zostavy pre meranie tepelnej difuzivity

Takto stanovené hodnoty efektívnej tepelnej difuzivity boli použité na porovnanie tepelného správania jednotlivých materiálov. V ďalšej časti práce boli zároveň využité ako doplnkové materiálové informácie pri medzimateriálovom regresnom odhade nominálnej hĺbky defektov.

DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

2.1 Výsledky stanovenia efektívnej tepelnej difuzivity

Efektívna tepelná difuzivita bola stanovená z časového priebehu teplotnej odozvy na zadnej strane vzorky pomocou Parkerovej metódy. Pre jednotlivé ROI oblasti bol určený priebeh teplotného nárastu $\Delta T(t)$, z ktorého bola následne stanovená maximálna hodnota teplotného nárastu $\Delta T_{\max}$ a polovičný čas maxima $t_{1/2}$. Polovičný čas maxima bol definovaný ako čas potrebný na dosiahnutie 50 % maximálneho nárastu teploty, pričom na jeho presnejšie určenie bola použitá lineárna interpolácia. Príklad krivky ochladzovania pre ROI 3 materiálu PLA s hodnotami použitými pri výpočte efektívnej tepelnej difuzivity je uvedený na Obr. 5.



Obr. 5 Krivka ochladzovania pre ROI 3 s hodnotami tepelnej difuzivity; materiál PLA

Výsledná hodnota efektívnej tepelnej difuzivity pre daný materiál bola určená ako priemer z vypočítaných hodnôt v jednotlivých oblastiach ROI. Ako miera variability bola použitá smerodajná odchýlka. Pri materiáloch so smerovo závislou štruktúrou, ako sú FDM tlačené vzorky, bola takto stanovená hodnota interpretovaná ako efektívna tepelná difuzivita v smere hrúbky vzorky. Výsledné hodnoty efektívnej tepelnej difuzivity skúmaných materiálov sú uvedené v Tab. 1.

Tab. 1 Výsledné hodnoty efektívnej tepelnej difuzivity skúmaných 3D tlačných materiálov

Materiál	Priemerná tepelná difuzivita α [mm ² /s]	Smerodajná odchýlka [mm ² /s]	Min. hodnota [mm ² /s]	Max. hodnota [mm ² /s]
PLA	0,1390	0,0023	0,1358	0,1418
PET-G	0,1421	0,0012	0,1402	0,1437
PET-G HF	0,1729	0,0008	0,1721	0,1739
Onyx	0,1568	0,0091	0,1453	0,1683

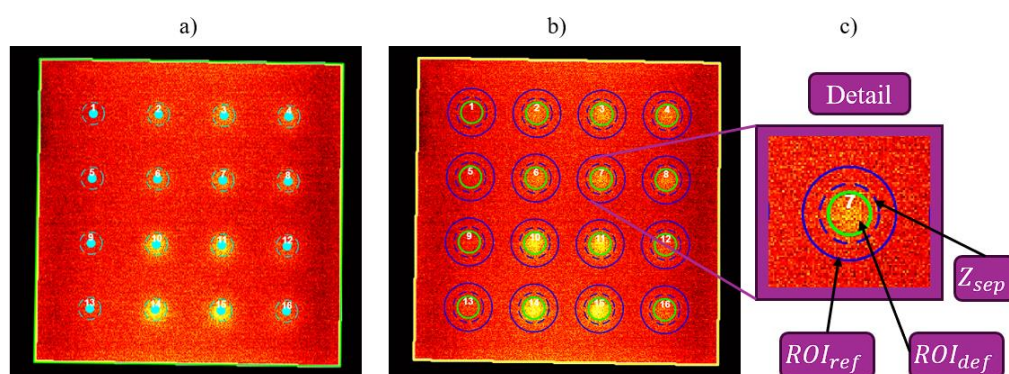
Z výsledkov uvedených v Tab. 1 vyplýva, že najnižšia priemerná hodnota efektívnej tepelnej difuzivity bola stanovená pre materiál PLA, zatiaľ čo najvyššia hodnota bola dosiahnutá pri materiáli PET-G HF. Materiál Onyx vykazoval vyššiu variabilitu hodnôt, čo sa prejavilo vyššou smerodajnou odchýlkou.

2.2 Spracovanie termografických dát v prostredí MATLAB

Termografické dáta boli zo softvéru LabIR exportované vo formáte .mat do výpočtového prostredia MATLAB ako trojrozmerné dátové pole, v ktorom dva rozmery predstavovali priestorové rozmery termogramu a tretí rozmer časovú sekvenciu snímok. Pre ďalšie spracovanie bola vytvorená polygonálna maska definujúca plochu vzorky, čím sa oddelila oblasť záujmu od pozadia a spracovanie sa obmedzilo len na relevantné obrazové dáta.

Keďže sa jednotlivé merania mohli mierne líšiť polohou a natočením vzorky v zornom poli infračervenej kamery, medzi aktuálne spracovávaným súborom a referenčným snímkom bola určená transformácia zahŕňajúca posun a rotáciu v rovine obrazu. Na základe tejto transformácie bola maska prenesená do súradnicového systému aktuálneho merania.

Po predspracovaní dát bola pre každú vzorku vygenerovaná výpočtová mriežka zodpovedajúca rozloženiu defektov. V jednotlivých pozíciách boli definované oblasti záujmu (ROI) pre miesta defektov a referenčná oblasť bez defektu. Z týchto oblastí boli následne generované teplotné krivky a kontrastné krivky, ktoré tvorili základ pre ďalšie spracovanie termografickej odozvy. Generovanie výpočtovej mriežky a oblastí ROI je znázornené na Obr. 6.

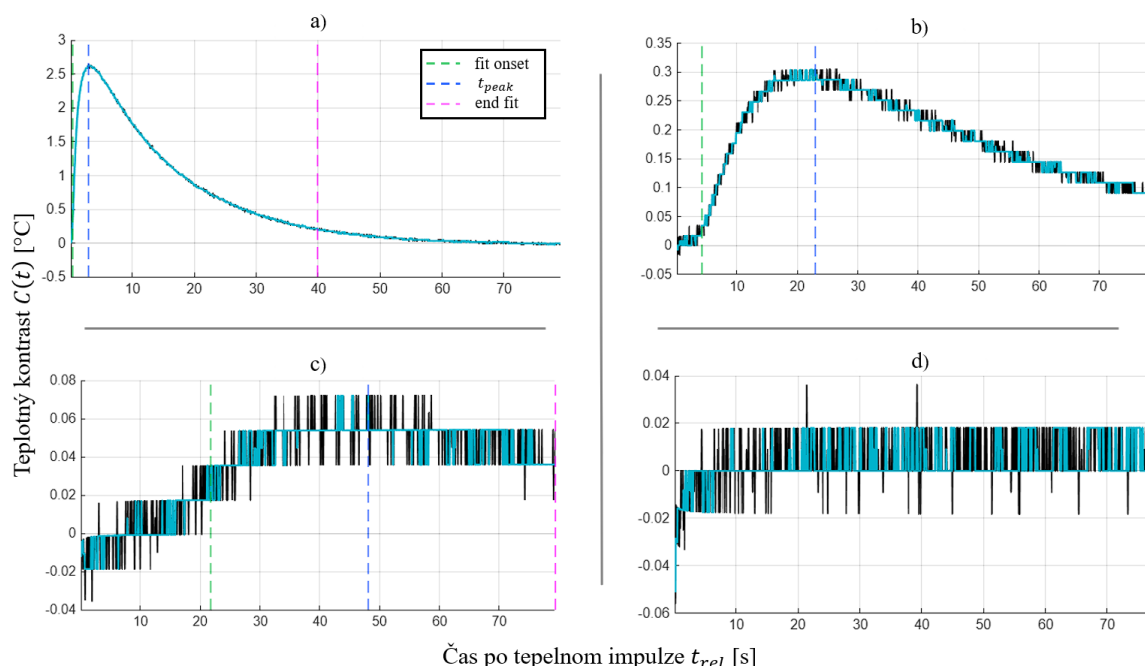


Obr. 6 Generovanie výpočtovej mriežky a oblastí záujmu: a) kontrola polohy vygenerovaných stredov defektov, b) definovanie oblastí ROI, c) detail defektu s vyznačením ROI oblastí

2.3 TSR aproximácia, hodnotenie CNR a extrakcia vstupných príznakov

Na základe teplotných priebehov boli pre jednotlivé pozície defektov vytvorené kontrastné krivky vyjadrujúce rozdiel medzi odozvou defektovej oblasti a referenčnej oblasti bez defektu. Pre každú

kontrastnú krivku bolo následne určené adaptívne časové okno vhodné na ďalšie spracovanie. Pri jeho určovaní boli zohľadnené maximálna hodnota kontrastu, čas jej výskytu a odhad úrovne šumu v referenčnej oblasti vzorky. Príklad adaptívneho určenia časového okna pre vybrané defekty a referenčnú časť vzorky PLA je znázornený na Obr. 7.



Obr. 7 Vzorka PLA, určenie adaptívneho okna: a) defekt 0,4 mm, b) defekt 1,6 mm, c) defekt 3,0 mm, d) referenčná časť vzorky

V rámci adaptívneho určenia intervalu boli stanovené charakteristické časové body kontrastnej odozvy, najmä nástup odozvy, začiatok intervalu vhodného pre TSR aproximáciu a koniec aproximáčného intervalu. Takto určený interval bol následne použitý pri aplikácii metódy Thermographic Signal Reconstruction. TSR aproximácia bola realizovaná na pôvodnej kontrastnej krivke s cieľom rekonštruovať a vyhladiť časový priebeh kontrastnej odozvy pri zachovaní základného tvaru signálu a potlačení vysokofrekvenčného šumu.

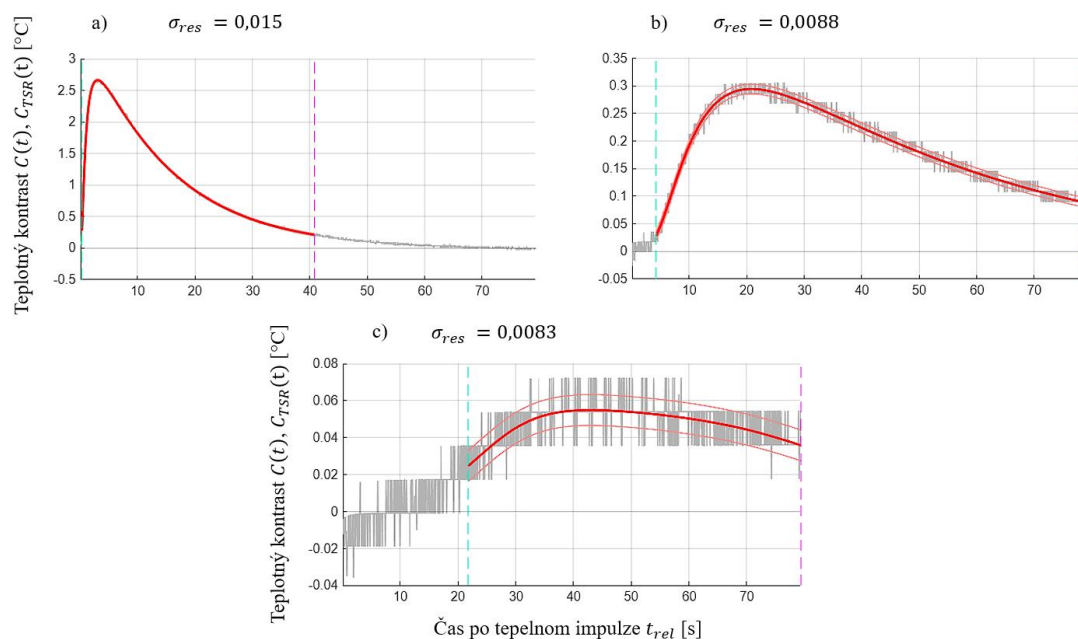
Súčasťou spracovania bolo aj kvantitatívne hodnotenie čitateľnosti defektov pomocou metriky CNR, ktorá vyjadruje pomer kontrastu odozvy defektu k úrovni šumu. Táto metrika bola použitá na porovnanie čitateľnosti defektov pri rôznych hĺbkach a materiáloch.

Zo spracovaných kontrastných kriviek boli následne extrahované vstupné príznaky opisujúce vybrané vlastnosti termografickej odozvy. Tieto príznaky zahŕňali amplitúdové a časové parametre, integrálnu odozvu v rámci adaptívne určeného intervalu a parametre súvisiace s kvalitou TSR aproximácie. Vytvorený súbor príznakov tvoril vstupné dáta pre následné hodnotenie defektov pomocou modelu doprednej neurónovej siete.

2.4 Výsledky TSR aproximácie kontrastných kriviek

Aplikáciou TSR aproximácie boli kontrastné krivky spracované v adaptívne určenom časovom intervale. Výsledné priebehy umožnili porovnať charakter termografickej odozvy defektov s rozdielnou nominálnou hĺbkou. Pri plytko uloženom defekte bola kontrastná odozva výrazná a maximum nastalo krátko po tepelnom impulze. Pri stredne hlbokom defekte bolo maximum kontrastu posunuté do

neskoršieho času a pri hlbokom defekte bola odozva slabšia a výraznejšie ovplyvnená šumom. Porovnanie experimentálnej kontrastnej krivky a jej TSR aproximácie pre vybrané defekty materiálu PLA je uvedené na Obr. 8.

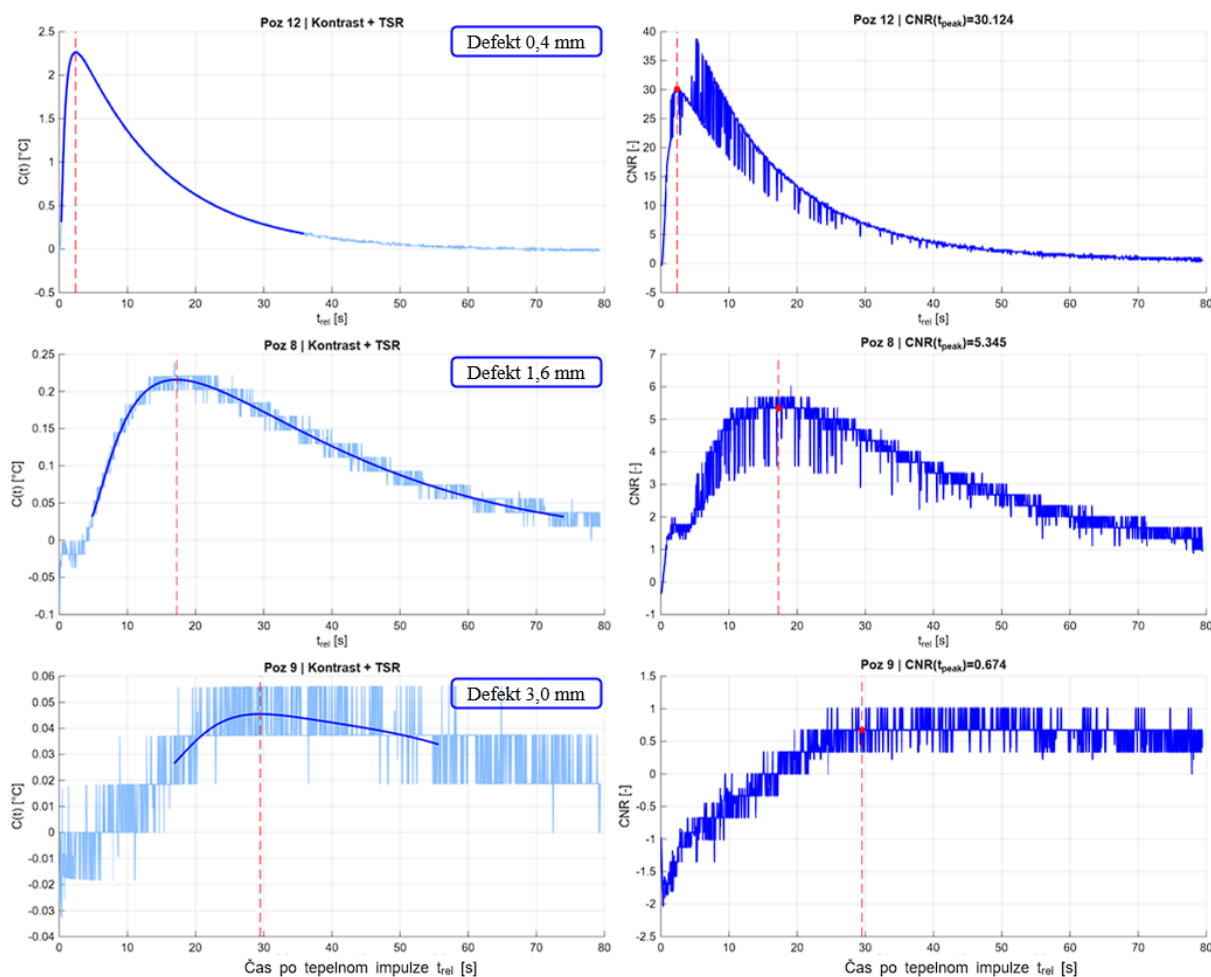


Obr. 8 Porovnanie kontrastnej krivky a jej TSR aproximácie pre materiál PLA: a) plytký defekt, b) stredný defekt, c) hlboký defekt

Tento výsledok potvrdzuje rozdielny časový charakter tepelnej odozvy v závislosti od nominálnej hĺbky defektu. Plytké defekty sa prejavovali skoršou a výraznejšou kontrastnou odozvou, zatiaľ čo hlbšie defekty vykazovali neskorší nástup a nižšiu hodnotu kontrastu.

2.5 Výsledky hodnotenia čitateľnosti defektov pomocou CNR

Na kvantitatívne hodnotenie čitateľnosti defektov bola použitá metrika CNR. Reprezentatívne výsledky boli analyzované pre hĺbky defektov 0,4 mm, 1,6 mm a 3,0 mm, ktoré predstavovali plytký, stredne hlboký a hlboký defekt. Porovnanie kontrastnej odozvy a priebehu CNR pre vybrané defekty materiálu Onyx je uvedené na Obr. 9.



Obr. 9 Porovnanie kontrastnej odozvy a CNR pre vybrané defekty materiálu Onyx

Na kvantitatívne porovnanie reprezentatívnych prípadov materiálov PLA a Onyx boli vybrané hodnoty času maxima TSR kontrastnej krivky a výsledné hodnoty CNR pre hĺbky defektov 0,4 mm, 1,6 mm a 3,0 mm. Tieto hodnoty sú uvedené v Tab. 2.

Tab. 2 Porovnanie kontrastnej odozvy materiálov PLA a Onyx pri geometrii g3

Hĺbka defektu [mm]	$t_{peak,TSR}$ [s]	PLA	$CNR_{t_{peak}}$ [-]	PLA	$t_{peak,TSR}$ ONYX [s]	$CNR_{t_{peak}}$ ONYX [-]
0,4	3,03		46,771		2,38	30,124
1,6	22,05		10,289		17,26	5,345
3	44,45		3,033		30,05	0,674

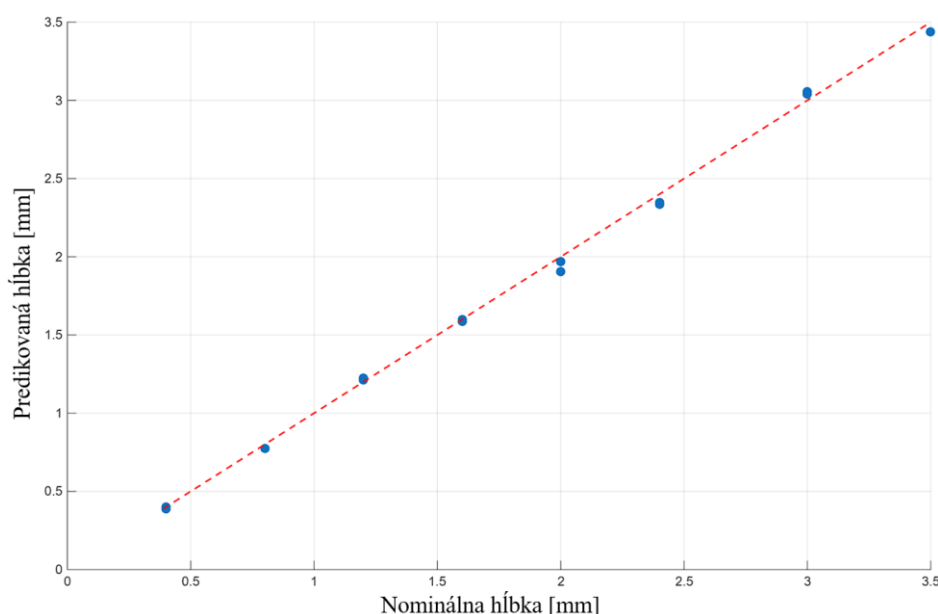
Z porovnania uvedeného na Obr. 9 a v Tab. 2 vyplýva, že materiál Onyx dosahoval pri všetkých hodnotených hĺbkach skorší čas maxima TSR kontrastnej krivky ako materiál PLA. Skorší výskyt maxima však neznamenal vyššiu čitateľnosť defektu, keďže kontrastná odozva materiálu Onyx mala nižšiu amplitúdu a bola výraznejšie ovplyvnená šumom. To sa prejavilo nižšími hodnotami CNR, najmä pri defekte s nominálnou hĺbkou 3,0 mm. Pri tomto defekte bola kontrastná krivka materiálu Onyx spracovaná v kratšom adaptívne určenom intervale, čo súviselo so slabšou a menej výraznou termografickou odozvou hlbšie uloženého defektu. Výsledky poukazujú na to, že pri hodnotení defektov nie je rozhodujúci iba čas výskytu maxima kontrastnej odozvy, ale aj jej amplitúda a pomer k úrovni šumu.

2.6 Regresný odhad nominálnej hĺbky defektov pomocou FFNN

Extrahované vstupné príznaky boli použité ako vstupné údaje pre model doprednej neurónovej siete. V práci sa do modelu nezavádzali celé termografické sekvencie, ale kompaktný príznakový opis získaný z kontrastných kriviek a ich TSR aproximácie. Tento prístup umožnil nahradiť rozsiahle obrazové dáta menším súborom numerických príznakov opisujúcich amplitúdu, časový priebeh, integrálnu odozvu a kvalitu aproximácie signálu.

Informačná hodnota vstupných príznakov bola najskôr overená pri klasifikácii hĺbkových tried. Následne bol model použitý na regresný odhad nominálnej hĺbky defektov. V prvom kroku bolo hodnotenie realizované pre materiál PLA, čím sa obmedzil vplyv rozdielnych materiálových vlastností. Výstupom neurónovej siete bola spojitá hodnota predstavujúca odhad nominálnej hĺbky defektu v milimetroch.

Presnosť regresného modelu bola hodnotená pomocou metrík MSE, RMSE, MAE a koeficientu determinácie R^2 . Príklad porovnania predikovaných a nominálnych hĺbok defektov pre model s najnižšou hodnotou MAE je uvedený na Obr. 10.



Obr. 10 Porovnanie predikovaných a nominálnych hĺbok defektov pri najnižšej hodnote MAE

Z porovnania predikovaných a nominálnych hodnôt vyplýva, že model dokázal zachytiť vzťah medzi extrahovanými príznakmi a nominálnou hĺbkou defektu. Najpresnejšie boli odhadované najmä stredné hĺbky defektov, zatiaľ čo pri hlbších defektoch sa prejavila vyššia chyba odhadu, súvisiaca so slabšou termografickou odozvou a nižšou čitateľnosťou defektov.

2.7 Medzimateriálové LODO hodnotenie regresného modelu

Extrahované vstupné príznaky boli následne použité pri regresnom odhade nominálnej hĺbky defektov pre spoločný dátový súbor materiálov PLA, PET-G, PET-G HF a Onyx. Po overení informačnej hodnoty príznakov pri klasifikácii a regresnom odhade v rámci jedného materiálu bolo ďalšie hodnotenie zamerané na schopnosť modelu pracovať s dátami viacerých materiálov s rozdielnym tepelným správaním.

Medzimateriálové hodnotenie bolo realizované pomocou LODO (Leave-one-depth-out) prístupu, pri ktorom bola z procesu učenia vynechaná vždy jedna nominálna hĺbka defektu. Cieľom bolo posúdiť schopnosť modelu odhadovať hĺbku defektu, ktorá nebola zahrnutá do tréningových dát. Hodnotené boli dva varianty modelu: model s piatimi vstupnými príznakmi extrahovanými z kontrastných kriviek a ich TSR aproximácie a model doplnený o efektívnu tepelnú difuzivitu príslušného materiálu. Výsledky medzimateriálového LODO hodnotenia sú uvedené v Tab. 3.

Tab. 3 Výsledky medzimateriálového LODO hodnotenia pre model bez a s efektívnou tepelnou difuzivitou

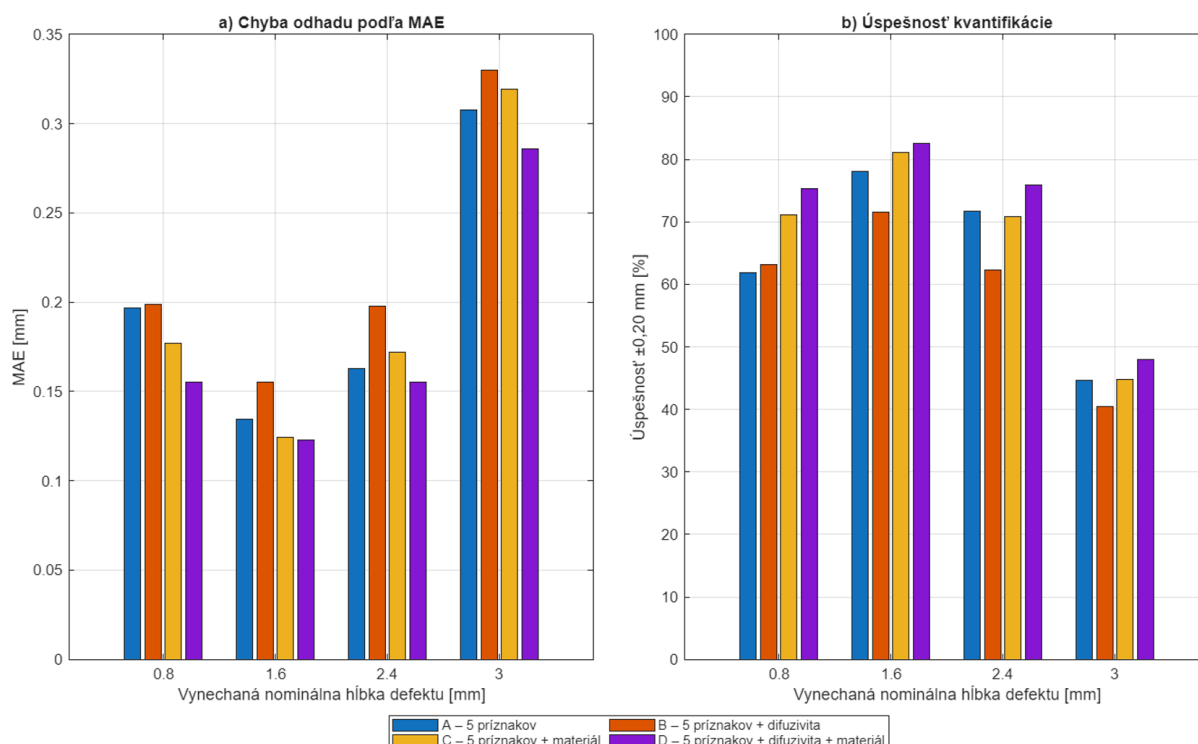
Vynechaná hĺbka [mm]	MAE bez dif. [mm]	MAE s dif. [mm]	Δ MAE [mm]	RMSE bez dif. [mm]	RMSE s dif. [mm]	Bias bez dif. [mm]	Bias s dif. [mm]
0,8	0,161	0,184	+0,023	0,190	0,219	+0,047	+0,049
1,6	0,136	0,135	-0,001	0,170	0,165	+0,054	+0,056
2,4	0,164	0,204	+0,040	0,211	0,256	+0,010	-0,026
3,0	0,336	0,335	-0,001	0,484	0,458	-0,101	-0,034

Z výsledkov uvedených v Tab. 3 vyplýva, že najnižšia chyba bola v oboch variantoch modelu dosiahnutá pri vynechanej hĺbke 1,6 mm. Tento výsledok nadväzuje na predchádzajúce hodnotenia, v ktorých sa stredne hlboké defekty prejavovali ako najlepšie kvantifikovateľné. Najvyššie hodnoty MAE a RMSE boli zaznamenané pri vynechanej hĺbke 3,0 mm, čo súvisí so slabšou termografickou odozvou hlbšie uložených defektov a ich nižšou čitateľnosťou. Doplnenie efektívnej tepelnej difuzivity nevedlo k jednoznačnému zlepšeniu výsledkov, keďže jej vplyv sa líšil v závislosti od vynechanej hĺbky defektu.

2.8 Vplyv vstupných príznakov na medzimateriálové LODO hodnotenie

Keďže samotné doplnenie efektívnej tepelnej difuzivity nevedlo k jednoznačnému zlepšeniu medzimateriálového regresného modelu, bol následne posúdený aj vplyv spôsobu zahrnutia materiálovej informácie do vstupného vektora. Porovnané boli štyri varianty vstupných údajov:

- A – päť vstupných príznakov extrahovaných z kontrastných kriviek a TSR aproximácie,
- B – päť vstupných príznakov doplnených o efektívnu tepelnú difuzivitu,
- C – päť vstupných príznakov doplnených o one-hot kódovanie materiálu,
- D – päť vstupných príznakov doplnených o efektívnu tepelnú difuzivitu a one-hot kódovanie materiálu.



Obr. 11 Vplyv vstupných príznakov na medzimateriálové LODO hodnotenie

Výsledky porovnania vstupných variantov ukázali, že samotná efektívna tepelná difuzivita nepredstavovala postačujúcu materiálovú informáciu na jednoznačné zlepšenie modelu. Významnejší prínos malo zahrnutie materiálovej príslušnosti prostredníctvom one-hot kódovania, prípadne kombinácia tejto informácie s efektívnou tepelnou difuzivitou. Tento výsledok poukazuje na to, že pri medzimateriálovom hodnotení defektov je potrebné zohľadniť nielen fyzikálnu materiálovú charakteristiku, ale aj samotnú príslušnosť záznamu ku konkrétnemu materiálu.

2.9 Porovnanie modelov FFNN a Random Forest pri medzimateriálovom LODO hodnotení

Cieľom tejto časti bolo overiť, či navrhnutý prístup založený na modeli doprednej neurónovej siete dosahuje presnejší regresný odhad nominálnej hĺbky defektov ako model Random Forest pri rovnakých vstupných príznakoch a rovnakom medzimateriálovom LODO hodnotení. Porovnanie bolo realizované pre vstupné varianty A–D definované v predchádzajúcej časti.

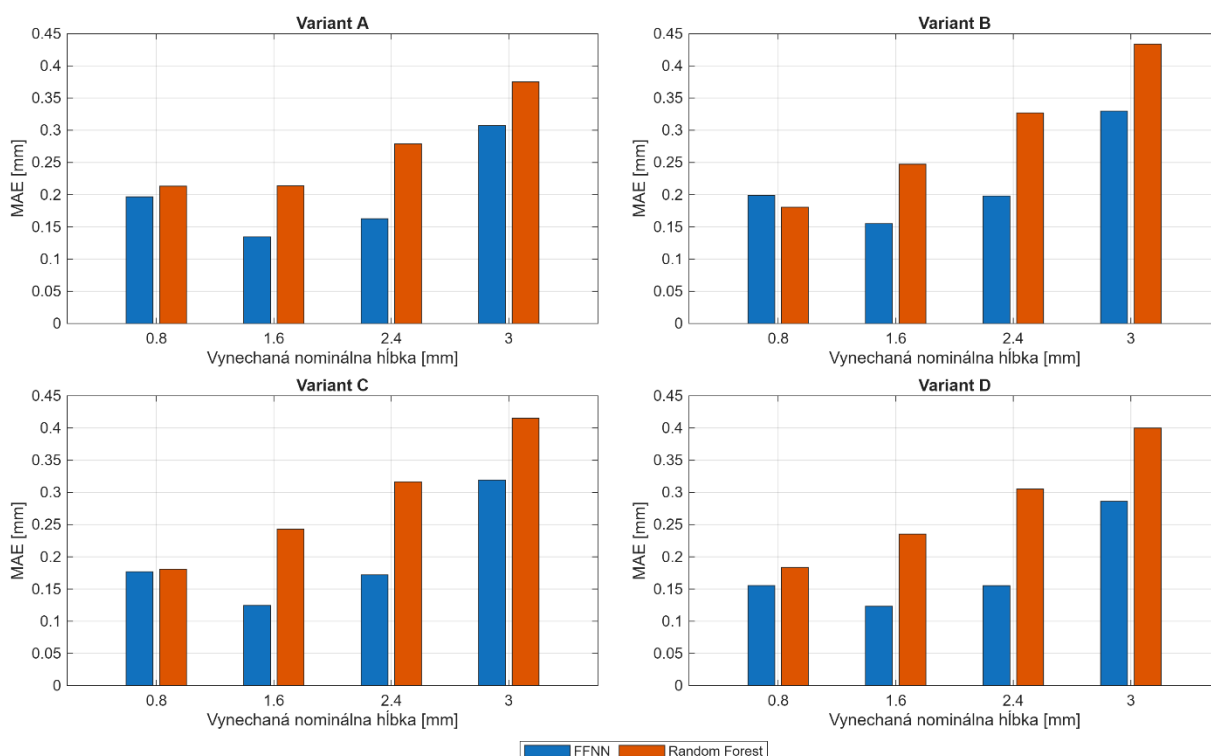
Výsledky boli hodnotené pomocou metrík MAE, Bias a úspešnosti kvantifikácie v tolerančnom pásme $\pm 0,20$ mm. Súhrnné porovnanie modelov podľa jednotlivých vstupných variantov je uvedené v Tab. 4.

Tab. 4 Porovnanie modelov FFNN a Random Forest pri medzimateriálovom LODO hodnotení

Variant	MAE FFNN [mm]	MAE RF [mm]	Bias FFNN [mm]	Bias RF [mm]	Úspešnosť FFNN [%]	Úspešnosť RF [%]
A	0,200	0,270	0,043	0,106	64,1	33,2
B	0,220	0,297	0,049	0,103	59,4	25,5
C	0,198	0,289	0,057	0,100	67,0	26,3
D	0,180	0,281	0,052	0,101	70,5	26,9

Hodnoty uvedené v Tab. 3 predstavujú priemer cez všetky hodnotené vynechané nominálne hĺbky defektov v rámci medzimateriálového LODO hodnotenia. Úspešnosť bola vyjadrená ako podiel

predikcií, pri ktorých absolútna odchýlka medzi predikovanou a nominálnou hĺbkou defektu neprekročila tolerančné pásmo $\pm 0,20$ mm. Grafické porovnanie hodnôt MAE pre jednotlivé vynechané nominálne hĺbky defektov je znázornené na Obr. 12.



Obr. 12 Porovnanie hodnôt MAE modelov FFNN a Random Forest pri spoločnom LODO hodnotení pre vstupné varianty A–D

Z výsledkov uvedených v Tab. 3 a na Obr. 10 vyplýva, že model FFNN dosiahol pri medzimateriálovom LODO hodnotení lepšiu kvantifikáciu nominálnej hĺbky defektu než model Random Forest. Priemerné hodnoty MAE boli v prípade FFNN nižšie vo všetkých vstupných variantoch A–D. Najnižšia priemerná hodnota MAE bola dosiahnutá pri variante D, ktorý zahŕňal päť základných vstupných príznakov, efektívnu tepelnú difuzivitu a informáciu o materiálovej príslušnosti. Rovnaký variant dosiahol aj najvyššiu úspešnosť kvantifikácie v tolerančnom pásme $\pm 0,20$ mm.

Zaujímavý je aj rozdielny vplyv rozšírenia vstupného vektora na oba modely. V prípade FFNN viedlo doplnenie materiálovej informácie a efektívnej tepelnej difuzivity k zlepšeniu výsledkov, zatiaľ čo pri modeli Random Forest boli najpriaznivejšie výsledky dosiahnuté pri variante A, teda pri použití samotných piatich základných vstupných príznakov. Pridanie ďalších vstupných premenných pri modeli Random Forest nevedlo k zlepšeniu kvantifikácie hĺbky defektu, naopak pri modeli FFNN sa najvyššia úspešnosť prejavila pri najrozšírenejšom variante vstupu.

Vo všetkých hodnotených variantoch bola úspešnosť modelu Random Forest výrazne nižšia než úspešnosť modelu FFNN. Na základe získaných výsledkov možno konštatovať, že navrhnutý prístup založený na kompaktnom vektore príznakov a modeli doprednej neurónovej siete predstavuje vhodný nástroj na medzimateriálový regresný odhad nominálnej hĺbky defektov.

PRÍNOS PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY A PRE PRAX

Výsledky dizertačnej práce majú prínos pre oblasť spracovania termografických dát a kvantitatívneho hodnotenia defektov v aditívne vyrábaných materiáloch. Práca prepája experimentálne meranie, automatizované spracovanie termografických sekvencií, hodnotenie čitateľnosti defektov a využitie extrahovaných príznakov pri regresnom odhade nominálnej hĺbky defektov.

Z hľadiska vedeckého prínosu možno za podstatné považovať experimentálne potvrdenie rozdielneho tepelného správania materiálov PLA, PET-G, PET-G HF a Onyx, návrh metodiky adaptívneho určenia časového intervalu pre TSR aproximáciu a definovanie súboru vstupných príznakov odvodených z kontrastnej krivky a jej TSR aproximácie. Práca zároveň kvantitatívne posúdila čitateľnosť termografickej odozvy pomocou metriky CNR a overila informačnú hodnotu extrahovaných príznakov pri klasifikácii hĺbkových tried a regresnom odhade nominálnej hĺbky defektov. Pri medzimateriálovom hodnotení bol posúdený aj vplyv efektívnej tepelnej difuzivity a materiálovej informácie na odhad hĺbky defektov pomocou modelu doprednej neurónovej siete.

Prínos pre pedagogiku spočíva v možnosti využitia navrhnutého postupu ako základu pre tvorbu laboratórnych úloh zameraných na bezkontaktné nedeštruktívne testovanie. Postup spracovania termografických sekvencií v prostredí MATLAB môže slúžiť ako príklad komplexného spracovania experimentálnych dát od načítania sekvencie, cez generovanie výpočtovej mriežky a oblastí ROI, až po extrakciu príznakov a prípravu vstupných údajov pre model doprednej neurónovej siete.

Prínos pre technickú prax súvisí najmä s hodnotením limitov detegovateľnosti defektov v polymérnych materiáloch, automatizovaným spracovaním termografických dát a podporou kontroly kvality komponentov. Vytvorený algoritmus v prostredí MATLAB umožňuje jednotné spracovanie termografických sekvencií, znižuje mieru manuálneho vyhodnocovania a vytvára základ pre opakovateľné hodnotenie defektov. Výsledky môžu slúžiť ako podklad pri hodnotení 3D tlačených prototypov, funkčných dielov a výsledných komponentov bez ich poškodenia.

RESUMÉ

The dissertation thesis deals with the non-destructive evaluation of defects in additively manufactured polymer and composite materials using pulsed infrared thermography and neural networks. The investigated materials were PLA, PET-G, PET-G HF and Onyx, in which artificial Flat-Bottom Hole defects with different nominal depths were created. The work combines experimental thermographic measurement, automated data processing in MATLAB, quantitative evaluation of defect readability and regression-based estimation of nominal defect depth.

The effective thermal diffusivity of the investigated materials was first determined using the Parker method. The main experimental measurements were then performed using pulsed optical infrared thermography in a reflection configuration. The obtained thermographic sequences were processed in MATLAB. The implemented algorithm included the definition of a polygonal mask, transformation of the mask into the coordinate system of the current measurement, generation of the computational grid, definition of defect and reference ROI regions and calculation of temperature and contrast curves.

For each contrast curve, an adaptive time interval was determined with respect to the maximum contrast value, the time of its occurrence and the estimated noise level in the reference region. The Thermographic Signal Reconstruction method was applied to the contrast curves in the selected interval. The processed curves were subsequently used for the extraction of input features describing the amplitude, time evolution, integral response and quality of approximation of the thermographic signal.

The readability of defects was quantitatively evaluated using the CNR metric. The results showed that defect readability depended on both the nominal defect depth and the investigated material. In the comparison of PLA and Onyx, the Onyx material reached earlier peak times of the TSR contrast curve, but its contrast response had lower amplitude and was more affected by noise. This resulted in lower CNR values, especially for deeper defects.

The extracted input features were used as input data for a feedforward neural network model. The information value of the features was first verified by classification of defect depth classes and was then used for regression-based estimation of the nominal defect depth. The regression evaluation was extended to an inter-material dataset containing PLA, PET-G, PET-G HF and Onyx. The influence of effective thermal diffusivity and material information on the estimation accuracy was also assessed.

The proposed FFNN approach was compared with a Random Forest model using the same input variants and the same inter-material LODO evaluation. The FFNN model achieved lower MAE values and higher quantification success within the ± 0.20 mm tolerance interval for all evaluated input variants. The best FFNN result was obtained for the variant combining the basic input features, effective thermal diffusivity and material information.

The significance of the proposed approach lies in connecting experimental pulsed thermographic measurement, automated data processing, reduction of thermographic sequences into a compact set of input features and their use in a regression model. The results show that the extracted features can be used for quantitative evaluation of defects in the investigated additively manufactured polymer and composite materials.

ZOZNAM LITERATÚRY

- [1] B. Wang, S. Zhong, T. L. Lee, K. S. Fancey, a J. Mi, "Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review", 01. apríl 2020, *SAGE Publications Inc.* doi: 10.1177/1687814020913761.
- [2] O. Isaac Abiodun, A. Jantan, A. Esther Omolara, K. Victoria Dada, N. AbdElatif Mohamed, a H. Arshad, "State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey", *Heliyon*, roč. 4, s. e00938, 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.
- [3] S. K. Dwivedi, M. Vishwakarma, a Prof. A. Soni, "Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review", *Mater Today Proc*, roč. 5, č. 2, s. 3690–3698, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.620.
- [4] X. P. V. Maldague, *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*. London: Springer London, 1993. doi: 10.1007/978-1-4471-1995-1.
- [5] W. Nsengiyumva, S. Zhong, J. Lin, Q. Zhang, J. Zhong, a Y. Huang, "Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures: A state-of-the-art review", 15. január 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112951.
- [6] "Iowa State University, Center for Nondestructive Evaluation". [Online]. Dostupné na: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/index.xhtml>. [Dátum: 28.4.2025]
- [7] A. A. Sarawade a N. N. Charniya, "Infrared Thermography and its Applications: A Review 2018 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)", IEEE, 2018.
- [8] D. Sharath, M. Menaka, a B. Venkatraman, "Defect Characterization Using Pulsed Thermography", *J Nondestr Eval*, roč. 32, č. 2, s. 134–141, jún. 2013, doi: 10.1007/s10921-012-0166-4.
- [9] B. Liu, H. Zhang, H. Fernandes, a X. Maldague, "Experimental Evaluation of Pulsed Thermography, Lock-in Thermography and Vibrothermography on Foreign Object Defect (FOD) in CFRP", *Sensors*, roč. 16, č. 5, s. 743, máj. 2016, doi: 10.3390/s16050743.
- [10] Z. Wang, G. Tian, M. Meo, a F. Ciampa, "Image processing based quantitative damage evaluation in composites with long pulse thermography", *NDT & E International*, roč. 99, s. 93–104, okt. 2018, doi: 10.1016/j.ndteint.2018.07.004.
- [11] A. Ardebili a M. H. Alaei, "Non-destructive testing of delamination defects in GFRP patches using step heating thermography", *NDT & E International*, roč. 128, s. 102617, jún. 2022, doi: 10.1016/j.ndteint.2022.102617.
- [12] C. Ibarra-Castanedo, M. Genest, S. Guibert, J.-M. Piau, X. P. V Maldague, a A. Bendada, "Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography: A comparative study".
- [13] A. Gleiter, C. Spießberger, a G. Busse, "LOCKIN-THERMOGRAPHY WITH OPTICAL OR ULTRASOUND EXCITATION". [Online]. Available at: <https://www.ndt.net/?id=8109>

- [14] A. Salazar, A. Mendioroz, E. Apiñaniz, A. Oleaga, P. Venegas, a I. Sáez-Ocáriz, "Characterization of delaminations by lock-in vibrothermography", *J Phys Conf Ser*, roč. 214, s. 012079, mar. 2010, doi: 10.1088/1742-6596/214/1/012079.
- [15] M. Jelinek a G. Reinhart, "Knowledge-based approach in the field of non-destructive inspection of CFRP metal hybrid components via optical lock-in thermography", *NDT & E International*, roč. 116, s. 102264, dec. 2020, doi: 10.1016/j.ndteint.2020.102264.
- [16] N. Rajic, "Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures", *Composite Structures*, roč. 58, č. 4, s. 521–528, dec. 2002, doi: 10.1016/S0263-8223(02)00161-7.
- [17] D. Gavrilov a R. Maev, "Extraction of Independent Structural Images for Principal Component Thermography", *Applied Sciences*, roč. 8, č. 3, s. 459, mar. 2018, doi: 10.3390/app8030459.
- [18] K. Zheng, Y.-S. Chang, K.-H. Wang, a Y. Yao, "Improved non-destructive testing of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites using pulsed thermograph", *Polym Test*, roč. 46, s. 26–32, sep. 2015, doi: 10.1016/j.polymertesting.2015.06.016.
- [19] X. Maidague, Y. Largoutit, a J.-P. Couturier, "A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments", 1998.
- [20] Z. Wei, A. Osman, D. Gross, a U. Netzelmann, "Artificial intelligence for defect detection in infrared images of solid oxide fuel cells", *Infrared Phys Technol*, roč. 119, s. 103815, dec. 2021, doi: 10.1016/j.infrared.2021.103815.
- [21] N. Saeed, N. King, Z. Said, a M. A. Omar, "Automatic defects detection in CFRP thermograms, using convolutional neural networks and transfer learning", *Infrared Phys Technol*, roč. 102, s. 103048, nov. 2019, doi: 10.1016/j.infrared.2019.103048.
- [22] R. Marani, D. Palumbo, V. Renò, U. Galietti, E. Stella, a T. D'Orazio, "Modeling and classification of defects in CFRP laminates by thermal non-destructive testing", *Compos B Eng*, roč. 135, s. 129–141, feb. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.10.010.
- [23] R. Marani, D. Palumbo, U. Galietti, a T. D'Orazio, "Deep learning for defect characterization in composite laminates inspected by step-heating thermography", *Opt Lasers Eng*, roč. 145, s. 106679, okt. 2021, doi: 10.1016/j.optlaseng.2021.106679.
- [24] H.-L. Chang, H.-T. Ren, G. Wang, M. Yang, a X.-Y. Zhu, "Infrared defect recognition technology for composite materials", *Front Phys*, roč. 11, júl. 2023, doi: 10.3389/fphy.2023.1203762.
- [25] P. Theodorakeas a M. Kouli, "Depth Retrieval Procedures in Pulsed Thermography: Remarks in Time and Frequency Domain Analyses", *Applied Sciences*, roč. 8, č. 3, s. 409, mar. 2018, doi: 10.3390/app8030409.
- [26] A. Schager, G. Zauner, G. Mayr, a P. Burgholzer, "Extension of the Thermographic Signal Reconstruction Technique for an Automated Segmentation and Depth Estimation of Subsurface Defects", *Journal of Imaging*, roč. 6, č. 9, s. 96, sep. 2020, doi: 10.3390/jimaging6090096.

- [27] Carosena Meola, *Infrared Thermography Recent Advances and Future Trends*. Bentham Science Publishers, 2012. 1 vyd., ISBN 978-1-60805-521-0
- [28] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, a F. G. Bulnes, "Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing.", *Sensors (Basel)*, roč. 14, č. 7, s. 12305–48, júl. 2014, doi: 10.3390/s140712305.
- [29] M. Kreidl, *Měření teploty*. BEN - technická literatura, 2005.
- [30] ResearchGate. *The heat Transfer Process During the Water Heating Process*. [obrázok online]. Dostupné na ingternete: https://www.researchgate.net/figure/The-Heat-Transfer-Process-During-the-Water-Heating-Process-Source-Processed-Data_fig1_393013542. [Dátum: 12.3.2024]
- [31] V. Peťková a J. Svoboda, *Termodiagnostika*. Vydavateľstvo VIENALA, 2016. ISBN: 978-80-8126-132-9
- [32] V. Vavilov a D. Burleigh, *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*. Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-48002-8.
- [33] DRAPER, J. W. 1847. On the production of light by heat. *Journal of the Franklin Institute*, roč. 44, č. 3, s. 197–203. doi: 10.1016/0016-0032(47)90320-7
- [34] *The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals*. FLIR AB.
- [35] G. Butcher, *Tour of the Electromagnetic Spectrum*. Government Printing Office, 2016. [online]. Dostupné na: <https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/08/tour-of-the-ems-tagged-v7-0.pdf>. [Dátum: 4.4.2024]
- [36] PITTS, D. G. a KLEINSTEIN, R. N. 1993. *Environmental Vision: Interactions of the Eye, Vision, and the Environment*. Boston: Butterworth-Heinemann. 422 s. ISBN 978-0-7506-9051-5
- [37] FMUSER. 2021. *Aký je rozdiel medzi AM a FM rádiom?* [obrázok online]. Dostupné na internete: <https://sk.fmuser.net/wap/content/?7842.html>. [Dátum: 11.11.2024]
- [38] NASA. "The Electromagnetic Spectrum". [Online] Dostupné na: <https://hubblesite.org/contents/articles/the-electromagnetic-spectrum>. [Dátum: 15.10.2025]
- [39] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, a F. G. Bulnes, "Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing", 10. júl 2014, *MDPI AG*. doi: 10.3390/s140712305.
- [40] Y. Doran, 2016. *Knowledge in Physics through Mathematics, Image and Language*, ResearchGate. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/321723023_Knowledge_in_Physics_through_Mathematics_Image_and_Language/figures, [Dátum: 3.6.2025]
- [41] Z. Qu, P. Jiang, a W. Zhang, "Development and application of infrared thermography non-destructive testing techniques", 02. júl 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/s20143851.

- [42] J. Svoboda, "INFRAČERVENÉ TERMOGRAFIKÉ (NEDESTRUKTIVNÍ) TESTOVÁNÍ INFRARED THERMOGRAPHIC (NON-DESTRUCTIVE) TESTING", 2012. [Online]. Available at: <https://www.ndt.net/?id=14433>
- [43] Y. K. Zhu, G. Y. Tian, R. S. Lu, a H. Zhang, "A review of optical NDT technologies", 2011. doi: 10.3390/s110807773.
- [44] D. A. Tossell, "Analysis of Heat Input Effects in Passive Thermographic NDE", v *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Boston, MA: Springer US, 1989, s. 1763–1770. doi: 10.1007/978-1-4613-0817-1_223.
- [45] V. P. Vasilov a D. D. Burleigh, "Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing", *NDT and E International*, roč. 73, s. 28–52, júl. 2015, doi: 10.1016/j.ndteint.2015.03.003.
- [46] V. P. Vasilov, *Nondestructive Testing: Handbook*, roč. 5. Moscow: Publishing house Spektr, 2009. ISBN 978-5-904270-03-2.
- [47] J. Zhu *et al.*, "Progress and Trends in Non-destructive Testing for Thermal Barrier Coatings Based on Infrared Thermography: A Review", 01. september 2022, *Springer*. doi: 10.1007/s10921-022-00880-3.
- [48] P. Theodorakeas, S. Sfarra, C. Ibarra-Castanedo, N. P. Avdelidis, M. Kouli, D. Paoletti. 2013. *The use of Pulsed Thermography dor the investigation of art and cultural heritage objects*, 5 Medzinárodná konferencia NDT, Atény, 20-23 Máj 2013, s. 1-11
- [49] R. Yang a Y. He, "Optically and non-optically excited thermography for composites: A review", 01. marec 2016, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.infrared.2015.12.026.
- [50] G. Thummerer, G. Mayr, a P. Burgholzer, "3D photothermal imaging of subsurface defects in composite materials", *NDT & E International*, roč. 122, s. 102476, sep. 2021, doi: 10.1016/j.ndteint.2021.102476.
- [51] A. Moskovchenko, M. Švantner, V.P. Vasilov, A. O. Chulkov. 2021. *Characterizing Depth of Defects with Low Size/Depth Aspect Ratio and Low Thermal Reflection by Using Pulsed IR Thermography*. *Materials*, 2021, 14(8), 1886. doi: 10.3390/ma14081886
- [52] W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Butler, G.L. Abbott. 1961. *Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity*. 1961. *Journal of Applied Physics*, 32(9), s. 1679-1684. doi: 10.1063/1.1728417.
- [53] TA Instruments. *Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity*. 2014. [online] Dostupné na: <https://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/BROCH-ThermalConductivityDiffusivity-2014-EN-1.pdf>, [Dátum: 5.5.2025]
- [54] L. Vozár, W. Hohenauer. 2003. *Flash method of measuring the thermal diffusivity a review*. *High Temperatures – High Pressures*, 2003. Vol. 35., s. 253-264, doi: 10.1068/htjr119.
- [55] J. Y. Wu, S. Sfarra, a Y. Yao, "Sparse Principal Component Thermography for Structural Health Monitoring of Composite Structures", *Elsevier B.V.*, jan. 2018, s. 855–860. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.09.675.

- [56] Z. Wang, G. Tian, M. Meo, a F. Ciampa, "Image processing based quantitative damage evaluation in composites with long pulse thermography", *NDT & E International*, roč. 99, s. 93–104, okt. 2018, doi: 10.1016/j.ndteint.2018.07.004.
- [57] S. M. Shepard, J. R. Lhota, B. A. Rubadeux, D. Wang, a T. Ahmed. 2003. "Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences", *Optical Engineering*, roč. 42, č. 5, s. 1337–1342. doi: 10.1117/1.1566969.
- [58] T. J. Ramírez-Rozo, H. D. Benítez-Restrepo, J. C. García-Álvarez, a G. Castellanos-Domínguez. 2013. "Non-referenced Quality Assessment of Image Processing Methods in Infrared Non-destructive Testing", v *Image Analysis and Processing – ICIAP 2013, Lecture Notes in Computer Science*, roč. 8157, Springer, Berlin, Heidelberg, s. 121–130. doi: 10.1007/978-3-642-41184-7_13.
- [59] D. Sharath, M. Menaka, a B. Venkatraman. 2013. "Defect Characterization Using Pulsed Thermography", *Journal of Nondestructive Evaluation*, roč. 32, č. 2, s. 134–141. doi: 10.1007/s10921-012-0166-4.
- [60] L. Ben Said, B. Ayadi, S. Alharbi, a F. Dammak. 2025. "Recent Advances in Additive Manufacturing: A Review of Current Developments and Future Directions", *Machines*, roč. 13, č. 9, 813, 2025. doi: 10.3390/machines13090813.
- [61] M. R. Kessler, "Polymer Matrix Composites: A Perspective for a Special Issue of Polymer Reviews", *Polymer Reviews*, roč. 52, č. 3, s. 229–233, júl. 2012, doi: 10.1080/15583724.2012.708004.
- [62] D. Brigante. *New Composite Materials: Selection, Design, and Application*. Cham: Springer International Publishing, 2014. ISBN 978-3-319-01636-8. doi: 10.1007/978-3-319-01637-5
- [63] D. D. L. Chung. *Composite Materials: Science and Applications*, 2. vyd. London: Springer, 2010. ISBN 978-1-84882-830-8. doi: 10.1007/978-1-84882-831-5.
- [64] F. C. Campbell. *Structural Composite Materials*. Materials Park, OH: ASM International, 2010. ISBN 978-1-61503-037-8.
- [65] D. B. Perez, E. Celik, a R. L. Karkkainen. "Investigation of Interlayer Interface Strength and Print Morphology Effects in Fused Deposition Modeling 3D-Printed PLA", *3D Printing and Additive Manufacturing*, roč. 8, č. 1, s. 23–32, 2021. doi: 10.1089/3dp.2020.0109.
- [66] N. Zohdi a R. C. Yang. "Material Anisotropy in Additively Manufactured Polymers and Polymer Composites: A Review", *Polymers*, roč. 13, č. 19, 3368, 2021. doi: 10.3390/polym13193368.
- [67] S. Wickramasinghe, T. Do, a P. Tran. "FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments", *Polymers*, roč. 12, č. 7, 1529, 2020. doi: 10.3390/polym12071529.
- [68] R. B. Heslehursts, *Defects and Damage in Composite Materials and Structures*, roč. 19. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.
- [69] I. Papa, E. Manco, G. Epasto, V. Lopresto, a A. Squillace. 2022. "Impact behaviour and non destructive evaluation of 3D printed reinforced composites", *Composite Structures*, roč. 281, 115112. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.115112.

- [70] F. Pace, A. G. Stamopoulos, M. Eckl, S. Senck, a J. Glinz. 2023. "Analysis of the Manufacturing Porosity in Fused Filament Fabricated Onyx/Long Fiber Reinforced Composites Using X-Ray Computed Tomography", *Journal of Nondestructive Evaluation*, roč. 42, č. 4, článok 86. doi: 10.1007/s10921-023-01000-5.
- [71] BAMBU LAB. Bambu Filament: Technical Data Sheet V3.0: PLA Basic [online]. Bambu Lab, b. r. [Dátum: 6.2.2025]. Dostupné z: https://wiki.bambulab.com/filament-acc/abs-asapc/bambu_pla_basic_technical_data_sheet.pdf
- [72] BAMBU LAB. Bambu Filament: Technical Data Sheet V1.0: PETG HF [online]. Bambu Lab, b. r. Dostupné z: <https://store.bblcdn.com/3a230e260a3a47c2b0db0156e07eef91.pdf>. [Dátum: 26.4.2025]
- [73] M. Tychanicz-Kwiecień, S. Grosicki, a M. Markowicz. "Experimental Investigation of Thermal Conductivity of Selected 3D-Printed Materials", *Materials*, roč. 18, č. 17, 3950, 2025. doi: 10.3390/ma18173950.
- [74] Z. Wei, A. Osman, B. Valeske, a X. Maldague. "Pulsed Thermography Dataset for Training Deep Learning Models", *Applied Sciences*, roč. 13, č. 5, 2901, 2023. doi: 10.3390/app13052901.
- [75] D. L. Balageas, J.-M. Roche, F.-H. Leroy, W.-M. Liu, a A. M. Gorbach. "The Thermographic Signal Reconstruction Method: A Powerful Tool for the Enhancement of Transient Thermographic Images", *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, roč. 35, č. 1, s. 1–9, 2015. doi: 10.1016/j.bbe.2014.07.002.
- [76] G. Poelman, S. Hedayatrasa, J. Segers, W. Van Paepegem, a M. Kersemans. "An Experimental Study on the Defect Detectability of Time- and Frequency-Domain Analyses for Flash Thermography", *Applied Sciences*, roč. 10, č. 22, 8051, 2020. doi: 10.3390/app10228051.
- [77] Y. Chung, S. Lee, a W. Kim. "Latest Advances in Common Signal Processing of Pulsed Thermography for Enhanced Detectability: A Review", *Applied Sciences*, roč. 11, č. 24, 12168, 2021. doi: 10.3390/app112412168.
- [78] MATHWORKS. mad: Mean or median absolute deviation [online]. Natick: The MathWorks, Inc., b. r. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/stats/mad.html>. [Dátum: 20.11.2025]
- [79] Q. Fang a X. Maldague. "A Method of Defect Depth Estimation for Simulated Infrared Thermography Data with Deep Learning", *Applied Sciences*, roč. 10, č. 19, 6819, 2020. doi: 10.3390/app10196819.
- [80] L. Breiman. "Random Forests", *Machine Learning*, roč. 45, č. 1, s. 5–32, 2001. doi: 10.1023/A:1010933404324.
- [81] S. Egodawela, A. K. Gostar, H. A. D. S. Buddika, W. A. N. I. Harischandra, A. J. Dhammika, a M. Mahmoodian. "Metal loss defect detection and depth estimation using multi-spectral image analysis of cooling excited steel specimen with corrosion", *Scientific Reports*, roč. 15, 23894, 2025. doi: 10.1038/s41598-025-88528-w.

PUBLIKOVANÁ LITERATÚRA AUTORA

1. DEGANOVÁ, L. – DEKÝŠ, V. – SAPIETA, M. – DRVÁROVÁ, B. 2024. *Creation of Algorithms in MATLAB Environment for a Non-Destructive Testing*. Applied Mechanics. 2024. – ISBN 978-80-554-2090-5, 1 vyd., s. 5-9
2. DRVÁROVÁ, B. - DEGANOVÁ, L. – DEKÝŠ, V. – SAPIETA, M. 2024. *Effect of Petg Composite Fibre Orientation on Damping*. Applied Mechanics. 2024. – ISBN 978-80-554-2090-5, s. 18-21.
3. DRVÁROVÁ, B. – DEGANOVÁ, L. – NOVÁK, P. – ZAPOMNĚL, J. – DEKÝŠ, V. 2024. *Comparison of Dissipation Energy in PLA, ABS, and PETG Materials used in 3D printing*. Machine Modeling and Simulation. *Acta Physica Polonica A* – ISSN 0587-4246, vol. 145, no. 6, s. 810-813. 2024. Doi: 10.12693/APhysPolA.146.810.
4. DEGANOVÁ, L. – DEKÝŠ, V. – DRVÁROVÁ, B. – ŠVANTNER, M. - SAPIETOVÁ, A. 2025. *Defect Analysis in 3D-Printed PLA Materials Using Pulsed Thermography and Advanced Post-Processing Techniques*. Transcom. 2025. DOI 10.1016/j.trpro.2025.11.084 – Transportation Research Procedia, ISSN 2352-1465, ISSN 2352-1457; Vol. 93, s. 549-556
5. VEREŠ, M. – KOZÁRIK, D. – DEGANOVÁ, L. – KOHÁR, R. – MADAJ, R. 2025. *A modular Test Strand for Studying Rotor Characteristics and Vibration Diagnostics*. Transcom. 2025. DOI 10.1016/j.trpro.2025.11.055 – Transportation Research Procedia, ISSN 2352-1465, ISSN 2352-1457; Vol. 93, s. 360-366
6. SAPIETOVÁ, A. - MINÁRIK, J. - SAPIETA, M. - DEKÝŠ, V. - DEGANOVÁ, L. 2025. *Modeling the influence of manufacturing inaccuracies on the kinematic accuracy of the Peaucelier mechanism*. Computational mechanics, 2025. *Proceedings of Computational mechanics. 2025*. ISBN 978-80-261-1254-9, s. 174-177
7. DEGANOVÁ, L. – DEKÝŠ, V. – DRVÁROVÁ, B. – VEREŠ, M. 2025 *Non-Destructive Evaluation of Moisture in Honeycomb Structures Using Pulsed Thermography and Post-Processing Methods*. Applied Mechanics. 2025. – ISBN 978-80-87434-11-6, 1 vyd., s. 18-21
8. DRVÁROVÁ, B. - DEGANOVÁ, L. - DEKÝŠ, V. 2025. *Experimental Investigation of the Impact of Print Orientation on the Damping Ratio of SLS – Manufactured PA 2200 Material*. 2025. Applied Mechanics, Mikulov – ISBN 978-80-87434-11-6, s. 24-27
9. SAPIETOVÁ, A. - PIROH, O. - DEGANOVÁ, L., SAPIETA, M. 2025. *Multisoftware synthesis of kinematic parameters MBS*. 2025. Applied Mechanics, Mikulov. – ISBN 978-80-87434-11-6, 1 vyd., s. 106-109

10. SAPIETOVÁ, A. - DEKÝŠ, V. - MINÁRIK, J. - SAPIETA, M. - DEGANOVÁ, L. 2026. *Effect of manufacturing inaccuracies on the Peaucellier linear mechanism*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2026.
11. AVVOCATO, G. – a kol. – DEGANOVÁ, L. 2025. *Advancing Active Thermography for NDT: The Role of Standardization, Proceedings, 2025*. Doi: 10.3390/proceedings2025129030 - ISSN 2504-3900 - Vol. 129, s. 1-4.
12. DEGANOVÁ, L. – DEKÝŠ, V. – SAPIETA, M. – SAPIETOVÁ, A. 2025. *Ultrasonic-Based Active Thermography for Determining Depth Detection Limits in Onyx Composites*. Manufacturing Technology, ISSN 1213-2489, Roč. 26, s. 1-14.
13. ŠAVRNOCH, Z. - DEGANOVÁ, L. - SÁGA, M., SAPIETA - M., DEKÝŠ, V. - SAPIETOVÁ, A. *Effect of disk tilt angle on critical speed variation in unbalanced rotor systems*, 2026. Mechanics of Advanced Materials and Structures. – ISSN 1537-6494. Vol. 33, s. 1-15. DOI 10.1080/15376494.2026.2628872.
14. MINÁRIK, J. – PIROH, O. – DEGANOVÁ, L. – MAJKO, J. 2025. *Porovnanie optimalizačných algoritmov pri spektrálnom ladení mechanickej sústavy*, Technológ, 2025. DOI 10.26552/tech.C.2025.4.9. – ISSN 1337-8996 – roč. 17, s. 43-47.