

## OPONENTSKÝ POSUDOK na dizertačnú prácu

**Autor** : Ing. Lukáš Muzika  
**Názov práce** : Infračervené nedeštruktívne testovanie povlakov  
**Fakulta** : Strojní, Západočeská univerzita v Plzni  
**Študijný program** : N2031 Strojní inžénrství  
**Študijný odbor** : 2303V015 Inžénrství speciálních technologií a materiálů  
**Školiteľ** : prof. Ing. Milan Honner, Ph.D  
**Oponent** : doc. Ing. Vladimír Dekýš, CSc.,

Na základe požiadavky predsedu odborovaj rady prof. Ing. Milana Honnera, Ph.D., z 6.10.2021, DFST/SO/70/K-21, som vypracoval tento posudok na dizertačnú prácu Ing. Lukáša Muzika.

Posudzovaná práca má celkom 122 strán, vrátane Citovanej literatúry (67 odkazov). Obsahuje 40 obrázkov a 24 tabuliek.

Hodnotenie:

### a. Zhodnotenie významu práce pre odbor.

Infračervené nedeštruktívne testovanie povlakov je perspektívna oblasť výskumu. Práca prispieva k pochopeniu interakcie materiálov so žiarením v rozsahu infračerveného spektra, modeluje odozvu na impulzné a harmonické budenie halogénovým reflektorom a zábleskovou lampou a tiež na impulzné budenie laserom. Odozva materiálov, resp. substrátu a povlaku je detegovaná MWIR kamerou a získané údaje sú spracované nástrojmi založenými na Fourierovej transformácii, P-funkciách a postupoch lock-in termografie. Porovnanie efektívnosti použitých postupov pre vybrané substráty a povlaky, ich efektívnosť pri určovaní hrúbky (resp. vlastností) povlakov, zostavené príslušné kalibračné krivky, analýza homogenity budiacich zdrojov a postupov merania na postavenom laserovom meracom systéme určite prispeje k rozvoju znalostí v tejto oblasti. Získané výstupy a použité postupy sú tiež použiteľné v priemyselnej praxi a v pedagogickom procese.

*Prácu považujem za významnú pre rozvoj poznania v príslušnom odbore.*

### b. Postup riešeného problému, použité metódy, splnenie stanovených cieľov.

Použitý postup riešenia a aplikované metódy hodnotím kladne. V práci bola vykonaná numerická simulácia v Matlabe, boli pripravené vzorky, analyzované podmienky merania napr.: vzhľadom k homogenite plošných budiacich zdrojov, minimalizácie doby potrebnej na skenovanie vzoriek pri laserovom budení, porovnanie výsledkov získaných rôznym spôsobom spracovania nameraných údajov, a porovnanie metód s využitím analýzy rozptylu.

*Ciele práce považujem za splnené.*

### c. Stanovisko k výsledkom dizertačnej práce a k pôvodnému konkrétnemu prínosu predkladateľa dizertačnej práce.

Dizertant vo svojej práci prezentoval množstvo vykonanej práce, vedúcej k splneniu vytýčeného cieľa. Presnejšie: aby mohol byť vykonaný experiment a spracované a interpretované výsledky, je potrebné riešiť veľké množstvo čiastkových úloh, čo sa mu úspešne podarilo. Chcel by som zdôrazniť predovšetkým aplikáciu P-funkcii a porovnanie tejto metódy spracovania výsledkov s inými, osvojenie si IRNDT

s laserovými budením testovaných objektov, porovnanie jednotlivých metód budenia a spracovania výsledkov, ich vhodnosť použitia pri určovaní hrúbky povlakov a schopnosti jednotlivých metód pri testovaní rôznych vzoriek.

*Moje stanovisko k výsledkom a prínosom dizertanta je pozitívne.*

**d. Systematickosť, prehľadnosť, formálna úprava a jazyková úroveň dizertačnej práce.**

Pripomienky sa týkajú predovšetkým prezentácie výsledkov. Nepovažujem za šťastne zvolenú preferenciu tabelárnych výstupov pred grafickými. Odporúčam dizertantovi zvážiť pri jeho ďalších prácach, napríklad:

1. Tabelárne výstupy majú síce svoju vypovedaciu schopnosť. Avšak im zodpovedajúca grafy môžu byť názornejšie, napr. Tab. 12.
2. Ak sa uvádzajú absolútne hodnoty veličín v tabuľkách a hovorí sa o odchýlkach medzi nimi, potom je možné miesto absolútnych hodnôt uvádzať v tabuľkách odchýlky týchto hodnôt od zvolených referenčných.
3. Ak sa porovnávajú napr. 2 súbory hodnôt, potom je vhodné tieto súbory vykresliť aj v jednom grafe, napríklad časť: „Ovčrení výsledků simulací pomocí experimentů“, kde by sa vykreslili prislúchajúce si výsledky zo simulácie a experimentu v jednom grafe.
4. Pri porovnávaní smerov x, y (zmien charakteristického času v smeroch x, y), by bolo vhodné v rámci obr. 27 uviesť grafické vyjadrenie pre oba smery. Napr. v podobe 2 obrázkov vedľa seba, jeden pre smer x a druhý pre smer y.

*Tieto pripomienky by mohli zlepšiť čitateľnosť dizertácie, ale neznižujú jej úroveň.*

**e. Publikácie dizertanta.**

*Publikácie hodnotím kladne.* Sú už na ne citačné ohlasy. 2 publikácie sú vedené v Current Contents.

**f. Otázky na dizertanta:**

1. Vysvetlite voľbu parametra n pri použití P-funkcií.
2. Obr. 20. Sú prezentované výstupy pre 125 snímkou a pre  $n = 0,4$ . Môžete prezentovať tieto výsledky pre rôzny počet snímkou a iné hodnoty n?
3. Obr. 21. Môžete prezentovať tieto výsledky pre rôzne n?
4. Interpretujte Tab. 20 a tiež výsledky obsiahnuté v tabuľke vo vzťahu k SPT, str.107.

**Záver**

Dizertačná práca Ing Lukáša Muziku, aj napriek formálnym pripomienkam, spĺňa kritéria kladené na práce tohto typu.

Na základe posúdenia: významu pre odbor, splnenia cieľov práce, použitého postupu riešenia, prínosu a výsledkov dizertanta, jeho publikačnej činnosti, významu práce pre prax a rozvoj vedného odboru, a splnenia legislatívnych podmienok predpísaných príslušnými zákonnými ustanoveniami a v súlade so zákonom č. 111/1998 Sb. a s čl. 50 odst. 8 Studijného a zkušebného rádu ZČU, odporúčam prácu prijať k obhajobe a po úspešnej obhajobe udeliť Ing. Lukášovi Muzikovi akademický titul

**philosophiae doctor (Ph.D)**

v študijnom odbore Inžénrství speciálních technologií a materiálů.

doc. Ing. Vladimír Dekýš, CSc.



**Ing. Lukáše Muziky**

## **"INFRAČERVENÉ NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ POVLAKŮ"**

### **a) Význam disertace pro obor**

Disertační práce Ing. Lukáše Muziky je významným příspěvkem k dalšímu rozvoji a praktickému využití nově vyvíjených metod nedestruktivního testování (NDT) na základě aktivní termografie. Termografické metody jsou intenzivně používány k NDT teprve v posledních 10 až 15 letech, kdy se na trhu objevily relativně levné infrakamery a další dynamická IR čidla, zatímco předtím sloužily nákladné bezkontaktní tepelné techniky převážně k hodnocení tepelných izolací a měření ustálených teplotních stavů různých konstrukcí, zejména ve stavebnictví. Aktivní termografie spolu s počítačovými simulacemi umožnila začlenit tepelné techniky jako plnohodnotné k ostatním defektoskopickým metodám detekce materiálových defektů (trhlin, koroze, vměstků, vadných svarů, obecněji „necelistvostí“, či lokálního poškození), přestože široká defektoskopická obec tyto metody stále považuje za spíše doplňkové a víceméně kvalitativní. To se týká i průmyslově významné oblasti testování povlaků či nástřiků apod., na něž je hlavně zaměřena posuzovaná disertace. Ing. Muzika již volbou tématu a zaměřením své práce i originálními přínosnými výsledky prokázal, že vhodně navržená metodika IRNDT včetně vyhodnocování rozsáhlých souborů dat moderními metodami analýzy signálů a obrazů, může na rozdíl od dosud standardně používaných termografických technik, překonat řadu dosavadních omezení, např. i při plošném měření tloušťky různých povlaků, nástřiků, či jinak upravených povrchových vrstev v kombinacích s nejrůznějšími materiály substrátů.

Disertační práce Ing. Muziky rozpracovává nově navrženou metodiku aktivní termografie do značné hloubky, jak co se týká různých technik tepelného buzení materiálu (FPT, HLIT, LPT), tak i zpracování a vyhodnocení výsledků a jejich porovnání se simulacemi. Značný význam posuzované disertační práce spočívá také v komplexním návrhu laserové pulsní termografie LPT, která může být použita i na rozměrných a tvarově složitých konstrukcích. Laserová pulsní termografie může obdivuhodně rozlišit i drobné defekty v rozmezí 10 – 20  $\mu\text{m}$ . Mezi přínosy disertace lze ocenit m.j. i zcela originální algoritmus vyhodnocení veličiny označované jako P-funkce a také méně obvyklý způsob skenování velké plochy pomocí Poissonových disků, který umožňuje podstatné zrychlení celé měřicí procedury.

### **b) Postup řešení problému, použité metody a splnění stanovených cílů**

Disertant si ve své disertační práci o celkovém rozsahu 122 stran vytkl několik náročných cílů, které jsou konkrétně zformulovány na str.52. Tři vytyčené cíle vycházejí z rozboru současných dostupných metod měření tloušťky povlaků a jejich omezení. Tomu jsou přizpůsobeny i návrhy experimentů a jejich vyhodnocování.

Hlavní cíl práce a ambice celého záměru jsou vyjádřeny již v úvodním odstavci na str.16, jako „...ověřit možnosti použití technik infračerveného testování pro zjišťování tloušťky povlaků a vytvořit nový způsob měření a vyhodnocení, který by překonal v současnosti nejlepší techniky infračerveného nedestruktivního testování používané na světových výzkumných pracovištích k analýzám tloušťky povlaků“.

Ze stručného popisu způsobů nanášení povlaků a diskuse různých NDT metod jejich testování vyplynulo, že nejčastěji používané standardní metody jako ET, VT, RT, UT, MT, PT, neumožňují kvantitativní hodnocení všech typů povlaků a substrátů, zatímco právě moderní metody aktivní termografie (TT) mohou být s výhodou použity u většiny kombinací

materiálů a v závislosti na typu tepelných zdrojů (buzení) způsobech vyhodnocení odezvy je lze optimálně přizpůsobit různým tělesům i účelům (kromě tloušťky povlaků i detekce vad).

Jako první cíl si disertant stanovil ověřit na základě publikovaných studií a vlastních pokusů vhodnost různých způsobů vyhodnocování pulsních termogramů pro stanovení tloušťky povlaku. Přitom navrhl zcela nový algoritmus zpracování pulsních termogramů, označovaný jako P-funkce. Disertant porovnával P-funkci s jinými standardními technikami a algoritmus P-funkce se v porovnání ukázal být přesnější a rychlejší. U tzv. lock-in termografie testoval další algoritmy zpracování, jako korelační metody, harmonickou aproximaci, SLIM techniku a další typy výpočtů. Důležitou součástí tohoto výzkumu byly počítačové simulace, které umožnily sledovat šíření tepla v různých konfiguracích, s různými materiály a parametry testování i zpracování výsledků. Výsledky provedených simulace byly následně ověřovány v experimentech s třemi různými zdroji buzení (pulsní a halogenová lampa a kontinuální laser). Synchronizace mezi budícím zdrojem a detektorem (IR kamera) byla zajišťována speciálním zařízením a softwarem. Pro účely kalibrace byly tloušťky povlaků měřeny také jinými standardními metodami (vířivé proudy, magnetická indukce), kdy se ukázaly přednosti termografických měření, která lze úspěšně použít prakticky ve všech případech různých povlaků a substrátů, což není možné u standardních NDT metod.

V další práci se pak disertant věnoval druhému cíli, vývoji nového systému laserové termografie pro měření tloušťky povlaků i detekci defektů. Výhodou tohoto systému je vysoká přesnost a velmi dobrá reprodukovatelnost, nevýhodou se ukazuje být menší rychlost měření s ohledem na nezbytné skenování povrchu se snímáním a zpracováním záznamů z IR kamery (velké rozsahy zpracovávaných dat). Podmínkou skenování je současně nutnost, aby se tepelné odezvy buzení na sousedních místech vzájemně neovlivňovaly (po excitaci musí ozářené místo vychladnout). Proto disertant využil různé metody skenování a jako nejlepší se ukázalo řídké rozložení skenovaných bodů, generovaných metodou Poissonova disku, přičemž pro vyhodnocování obrazců pulsní termografie byl použit algoritmus P-funkce, jehož hlavní výhodou je časová transformace termografické sekvence do jednoho výsledného snímku.

Po sestavení a uvedení do chodu nového zařízení pro laserovou aktivní termografii přistoupil disertant k realizaci třetího vytyčeného cíle – k ověřování funkce a vlastností sestaveného zařízení na vzorcích nástřikových povlaků a kvantitativnímu hodnocení jejich tloušťky. K hodnocení použil parametr, označený jako SPT, který udává sklon lineární závislosti mezi tloušťkou a vyhodnocovaným parametrem jako např. fáze FFT, charakteristický čas u P-funkce apod. (kalibrační rovnice). Důležitým parametrem je také prostorové rozlišení při porovnávání plošných a bodových měření. Rozdíly v tepelném přenosu u vzorků s různou tloušťkou povlaku byly také ověřovány pomocí simulací v MATLABU (program COMSOL) na virtuálních vzorcích s různými materiálovými vlastnostmi substrátu i povlaku, kromě simulací byl experimentálně ověřován také např. vliv pozice vzorku pod pulsním zdrojem (flash lampou) a další faktory. U laserové termografie byly testovány 2 druhy laserů s vlnovými délkami 532 resp. 1070 nm. Ověřovány pak byly také časová i prostorová optimalizace skenování.

V závěrečných cca 30 stranách uvádí disertant výsledky provedených měření a porovnání nového systému laserové termografie s flash pulsní termografií (FPT) a halogenovou lock-in pulsní termografií (HLIT). Výsledky ukazují, že kalibrační závislosti tloušťky na vyhodnocených parametrech měření se nejlépe osvědčily výpočty pomocí analytického modelu, ale k tomu je nutné přesně znát hodnoty materiálových vlastností. Porovnání termografických technik prokázalo, že nově vyvinuté zařízení pro laserovou termografii (LPT) dává s využitím navržených algoritmů nejlepší výsledky.



### c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a původnímu konkrétnímu přínosu disertanta

Konkrétní přínosy své práce shrnuje disertant v souhrnu na stranách 113 a 114 a v závěru na stranách 115 a 116. Za nejdůležitější lze v souladu s vytčenými záměry považovat závěr, že metodika aktivní termografie, zejména pak ve spojení s novými algoritmy vyhodnocování je vhodná pro testování tloušťky povlaků a nástřiků pro všechny materiály s alespoň minimální diferencí tepelných charakteristik povlaku a substrátu. Rozbor současných termografických metod, vhodných jak pro zjišťování tloušťky povlaků, tak i pro diagnostiku necelistvostí, ukázal spolu s výsledky vlastních experimentů a počítačových simulací, prokázal použitelnost těchto metod, ale s mnohými omezeními, jako jsou např. nehomogenní plošný osvit u FPT, ale také značné nevýhody používaných metod vyhodnocování. Také metoda HLIT se pro určování tloušťky povlaků ukázala jako prakticky nepoužitelná, přestože výsledky simulací i experimentů v literatuře ukazují na dobrou použitelnost při homogenním ohřevu tělesa.

Originálním výsledkem disertanta se jeví nově navržený způsob zpracování pulsních termogramů, označovaný jako P-funkce, s následnou kalibrační závislostí mezi tloušťkou povlaku a charakteristickým časem. Přednosti tohoto vyhodnocování byly ověřeny jak experimentálně, tak simulacemi.

Dalším konkrétním přínosem disertanta je návrh, konstrukce a důkladné ověření funkce nového měřicího systému laserové termografie. Využití dobře zvoleného laseru jako bodového zdroje přináší výhody rovnoměrného ohřevu s dobře definovanými vlastnostmi i výhody možné časové optimalizace při vhodně zvoleném skenování, jako jsou např. použité Poissonovy disky. Důležité je, že oproti FPT metodě přináší LPT větší citlivost na rozdílné tloušťky, což zvyšuje přesnost termografických měření.

Nelze než souhlasit s disertantem, že nahrazení IR kamery bodovým detektorem teploty by metodu LPT dále posunulo na vyšší úroveň.

### d) Vyjádření k přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni práce

Posuzovaná disertační práce Ing. Muziky je po formální stránce velmi pečlivě vypracována a autor zde uvádí množství tabulek a grafů ilustrujících jak použité metody, tak získané výsledky. Disertační práce zahrnuje větší množství řešených problémů, které se vzájemně prolínají. Její členění na tři díly odpovídající hlavním cílům se mi jeví jako méně organické, neboť občas není zcela zřejmé, kdy autor diskutuje problémy v citovaných pracích a kdy se opírá o vlastní poznatky získané simulacemi nebo experimentálně, i když se přitom odkazuje na vlastní dřívější publikace. Matoucí je i střídavé číslování kapitol resp. úkolů, v němž se čtenář poněkud ztrácí.

Práce obsahuje minimum překlepů. Vyjadřování disertanta je stručné, v některých místech až na úkor srozumitelnosti. Méně vhodné je nadužívání anglickanismů, či místo ustálených českých výroků používání počestlých anglických výrazů.

Chápu, že disertant pravděpodobně není zběhlý v NDT metodách, ale ve stručném výkladu základních metod, označovaných zkratkami jako ET, PT, RT, UT, VT apod. se mohl držet např. jednoduché příručky ČNDT, místo konstatování např. na str.21, 22, že vířivé proudy magnetické indukční metody jsou kontaktní, což nemusí být pravda, nebo při vysvětlení ultrazvukové metody (s. 24) konstatuje nutnost použití „vodivého“ gelu, kde jde o akustickou a nikoli elektrickou vodivost, podobně také str.26). Zavádějící je také tvrzení na str. 26, že ultrazvuková metoda využívá průchod UZ vln materiálem (nemusí jít pouze o průchod, ale i odraz apod.). U RT metod autor konstatuje, že rozdíl mezi gama a rtg. Zářením je především v jeho tvorbě. Proti tomu nic nenamítám, ale rozdíly jsou především ve vlnové délce. Také popis kapilární metody je trochu méně vhodný („...Funguje tak, že do vady vnikne aplikovaný

penetrační roztok, který lze poté zachytit okem...). Méně vhodný se mi jeví i další anglikanizmy, jako na str.31 „quartz“ lampa (quartz je křemen, či obecněji krystal; zde se jedná zpravidla o křemenné sklo). Na str.38 se u FT reálná složka označuje jako soufázová a imaginární jako kvadrurní. Myslím, že pro označení metody na str.42 (logarithmic peak second derivative method) bylo možné lépe použít jednoduchý český překlad. Podobně pro „afterglow“ jev lze jednoduše použít „odlesk“.

Proti anglickým výrazům v českých textech nic nenamítám, jen se domnívám, že tam, kde lze použít jednoduše český výraz či jednoznačný překlad, bych mu dal přednost, zvláště tam, kde anglický přímo nevyplývá z daného kontextu (je třeba složité vysvětlování).

Ještě mám dotaz ke koncepci skenování na str.101. Z textu a obr. 34 není zřejmý způsob skenování; jde zřejmě o mechanické skenování (mechanický pohyb laseru i kamery). Možná se mýlím, neboť např. skenovací hlava firmy Polytec umožňuje optické výchylky do 20 stupňů, u některých systémů je možné elektrooptické rozmítání. V každém případě by zde byl vhodný jednoduchý vysvětlující náčrt.

#### e) Vyjádření k publikacím doktoranda

V příloze i a ii uvádí disertant seznam vlastních dosud publikovaných prací, jejichž byl autorem či spoluautorem. Nejprve je zde uvedeno 5 impaktovaných článků, souvisejících s disertační prací. U tří z nich je Ing. Muzika uveden jako první autor s většinovým podílem na autorství. Všechny tyto články jsou z minulého roku. Další dva impaktované články jsou z r. 2018. Impakt faktory zde nejsou uváděny zejména z hlediska novosti publikací.

Dále disertant uvádí 4 konferenční příspěvky přímo spojené s disertací a další 4, dle názvů také související s tematikou disertační práce.

Zvláště je uveden příspěvek, který získal první místo v rámci disertačních prací studentské konferenci SVOČ FST 2019. Některé z uváděných prací jsem si prohlédl a mohu konstatovat jejich vysokou úroveň, srovnatelnou s posuzovanou disertační prací.

Domnívám se, že publikační činnost disertanta a množství uváděných hodnotných výsledků dostatečně vypovídá o jeho schopnostech samostatné vědecké práce, a zde uvedený výčet jeho publikací splňuje požadavky na obhajobu disertační práce v plné míře.

#### f) Doporučení disertační práce k obhajobě

Disertační práci Ing. Lukáše Muziky jsem důkladně prostudoval a mohu konstatovat, že přináší celou řadu originálních postupů a výsledků, a také komplexní návrh i zkoušky nového, prakticky využitelného zařízení pro laserovou aktivní termografii jako nástroj nedestruktivní diagnostiky povlaků nanášených na povrchy konstrukčních součástí. Posuzovaná disertační práce je významným příspěvkem k dosud málo rozvinuté nedestruktivní metodice aktivní termografie. Tato práce splňuje kritéria kladená na disertační práce a jednoznačně ji doporučuji k obhajobě.

V Praze, 11.11.2021



Ing. Zdeněk Převorovský, CSc.