

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní**

Czech Technical University in Prague
Faculty of Mechanical Engineering

Mgr. Elena Pivarčiová, PhD.

**VYUŽITIE HOLOGRAFICKEJ INTERFEROMETRIE
VO VYBRANÝCH TECHNICKÝCH APLIKÁCIÁCH**

**THE USE OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY
IN SELECTED TECHNICAL APPLICATIONS**

SUMMARY

Experimental methods play an important role in solving problems in scientific research and in practice as well. They also include optical method based on holography.

Holography is an optical depicting method, which started to develop intensively in the half of the 60' of the last century. It developed as a kind of a photograph which records three dimensional images – holograms on a recording medium. The observer can watch in the space virtual three dimensional image of an object. In the presence holography belongs among remarkable measuring and diagnostic methods and is used to observe processes and phenomena in various sciences and in practice too, as well as to secure objects against forgery and to prepare artistic works.

Based on holography there was developed an experimental and diagnostic method: holographic interferometry. It is used for optical non-contact determination of a form, observing static and dynamic deformations of various types of objects, to visualize temperature and concentration fields.

The lecture describes holographic interferometry as a scientific and technical research method which is used for measurement and control in scientific and industrial applications, for solving special tasks e.g. in engineering and wood processing research and practice.

Practical use of the method of holographic interferometry requires knowledge from various sciences such as coherent optics, laser technique, experimental mechanics, applied mathematics, computer or programming skills and at the same time the particular science which the application concerns.

The advantage of the method is first of all the fact that the holographic interferometry enables to gain a complete image of the investigated object, information about shifts of points on the whole surface of the object. Gained results give information about the real state of the object and enable to learn better the relations of the observed phenomena and development of non-stationary processes. The method is precise and does not require entry of a mechanical sensor which might influence the investigated processes.

In the lecture there are mentioned some applications of holographic interferometry carried out at the Technical University in Zvolen, continually included into pedagogical process. Further there are mentioned several ways of use which successfully supported processes of construction, control and management of products, production machines, production processes and technologies.

SÚHRN

Experimentálne metódy majú významnú úlohu pri riešení úloh vo vedeckom výskume aj v praxi. Medzi takéto metódy patria aj optické metódy na báze holografie.

Holografia je optická zobrazovacia metóda, ktorá sa začala intenzívne rozvíjať v polovici 60-tych rokov minulého storočia. Vyvinula sa ako druh fotografie, ktorá na záznamové médium zachytáva trojrozmerné obrazy – hologram. Pozorovateľ v priestore môže sledovať virtuálny trojrozmerný obraz predmetu. V súčasnosti holografia patrí medzi významné meracie a diagnostické metódy a využíva sa na sledovanie procesov a javov v rôznych vedných disciplínach aj v praxi, tiež na zabezpečenie predmetov proti falšovaniu a na prípravu umeleckých diel.

Na báze holografie bola vyvinutá experimentálna a diagnostická metóda: holografická interferometria. Používa sa pre optické bezkontaktné zisťovanie tvaru, sledovanie statických aj dynamických deformácií rôznych typov objektov, na vizualizáciu teplotných a koncentračných polí.

Prednáška približuje holografickú interferometriu ako metódu vedeckého a technického výskumu, ktorá sa používa pre merania a kontroly vo vedeckých aj priemyslových aplikáciách, pri riešení špeciálnych úloh, napr. v strojárskom a drevárskom výskume a praxi.

Praktická realizácia metód holografickej interferometrie vyžaduje vedomosti z rôznych oblastí vedy, ako je koherentná optika, laserová technika, experimentálna mechanika, aplikovaná matematika, počítačové prípadne aj programátorské zručnosti a zároveň príslušný odbor, ktorého sa problematika aplikácie týka.

Výhodou metódy je predovšetkým to, že holografická interferometria umožňuje získať ucelený obraz skúmaného objektu, informácie o posunutíach bodov na celom povrchu objektu, cez ktorý svetelná vlna prechádza, alebo od ktorého sa odráža, a to aj bez priameho kontaktu s objektom. Získané výsledky poskytujú informácie o skutočnom stave objektu, umožňujú lepšie poznať súvislosti sledovaných javov aj vývoj nestacionárnych dejov. Metóda je presná a nevyžaduje vstup mechanického snímača, ktorý by mohol ovplyvniť sledované procesy.

V prednáške sú uvedené niektoré aplikácie holografickej interferometrie realizované na Technickej univerzite vo Zvolene, priebežne zaraďované aj do pedagogického procesu. Ďalej sú uvedené niektoré uplatnenia, ktoré úspešne podporili procesy konštrukcie, kontroly a riadenia výrobkov, výrobných strojov, výrobných procesov a technológií.

Kľúčové slová

holografia, holografická interferometria, hologram, interferenčné pružky, Mach-Zehnderov interferometer, difúzne odrážajúce predmety, fázové predmety, technické aplikácie, teplotné polia, koncentračné polia, rezonančné frekvencie, pílové kotúče, vibrácie, deformácie, korpus huslí, strižník, klenok

Key words

holography, holographic interferometry, hologram, interference stripes, Mach-Zender interferometer, diffusionally reflective objects, phase objects, technical applications, thermal fields, concentration fields, resonance frequencies, saw blades, vibrations, deformations, violin body, metal sheet shear, shank

OBSAH

Summary	2
Súhrn	3
Obsah	5
Úvod.....	6
1 Holografická interferometria	6
1.1 Prístrojové zabezpečenie	7
1.2 Princíp holografickej interferometrie	8
2 Využitie holografickej interferometrie vo vybraných technických aplikáciách.....	9
2.1 Aplikácie holografickej interferometrie pre transparentné predmety	9
2.1.1 Vizualizácia teplotných polí pri tepelnom zaťažení dreva.....	9
2.1.2 Sledovanie požiarnej odolnosti skúšobných telies na báze dreva	11
2.1.3 Vizualizácia difúznych procesov	12
2.2 Aplikácie holografickej interferometrie pre difúzne odrážajúce objekty	14
2.2.1 Sledovanie rezonančných frekvencií pílových kotúčov.....	14
2.2.2 Diagnostika akustických a vibračných vlastností korpusu huslí	17
2.3 Uplatnenie holografickej interferometrie v procesoch konštrukcie, kontroly a riadenia	20
2.3.1 Zobrazenie vzduchových prúdov.....	21
2.3.2 Deformácia vystrihovacieho nástroja	21
2.3.3 Kontrola pneumatík	22
2.3.4 Meranie vibrácií	22
2.3.5 Sledovanie vplyvu vibrácií na quartzové rezonátory	23
2.3.6 Priehyb klenkov.....	23
3 Výhody, nevýhody holografickej interferometrie	24
Záver	25
Literatúra	28
Mgr. Elena Pivarčiová, PhD.....	31

VYUŽITIE HOLOGRAFICKEJ INTERFEROMETRIE VO VYBRANÝCH TECHNICKÝCH APLIKÁCIÁCH

Úvod

Experimentálne metódy zohrávajú významnú úlohu pri riešení úloh v základnom aj aplikovanom výskume. Používajú sa pre overenie výsledkov teoretických výpočtov, pre upresnenie matematických modelov a niekedy sú jedinou možnosťou riešenia problémov. Medzi takéto metódy patria aj optické metódy holografie a holografickej interferometrie.

Holografia je optická metóda získania trojrozmerného obrazu predmetu, ktorá je založená na interferencii svetelných vln. Pomocou holografie sa vytvára hologram, ktorý v dvojrozmernom zázname umožňuje trojrozmerné sledovať objekty (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, 2001), (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, 2007).

Holografická interferometria sa využíva na sledovanie procesov a javov v rôznych vedných disciplínach, aj na riešenie špeciálnych úloh praxe. Využíva sa aj na našom pracovisku: Technickej univerzite vo Zvolene – hlavne v strojárskom a drevárskom výskume, napr. pre vyšetrovanie rezonančných frekvencií pílových kotúčov, sledovanie vnikania rezného klina do dreva, v aerodynamike sušiaceho procesu, skúmanie tepelných vlastností rôznych materiálov, vyšetrovanie napätí v medzizubovej medzere pílových nástrojov, pri návrhu hudobných nástrojov, atď.

Výhodou je predovšetkým to, že umožňuje získať ucelený obraz skúmaného objektu a nevyžaduje vstup mechanického snímača, ktorý by mohol ovplyvniť sledované pole. Získané výsledky poskytujú informácie o skutočnom stave objektu, umožňujú lepšie poznať súvislosti sledovaných javov aj vývoj nestacionárnych dejov.

1 HOLOGRAFICKÁ INTERFEROMETRIA

Holografická interferometria umožňuje získať informáciu vo forme pozorovateľného interferenčného obrazu, v ktorom sú zaznamenané informácie charakterizujúce zmenu aspoň jedného fyzikálneho stavu skúmaného objektu (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, 2007).

Výhodou holografickej interferometrie je možnosť jej použitia pre skúmanie predmetov s **povrchom difúzne odraďajúcim svetlo** (nepriezračné) – konkrétne reálne predmety, od ktorých sa svetelná vlna odráža, alebo pre **fázové predmety** (transparentné – priezračné objekty, cez ktoré svetelná vlna prechádza), ktoré menia fázu svetelnej vlny (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, DUBOVSKÁ, 2003), (LIŠKA, 1983).

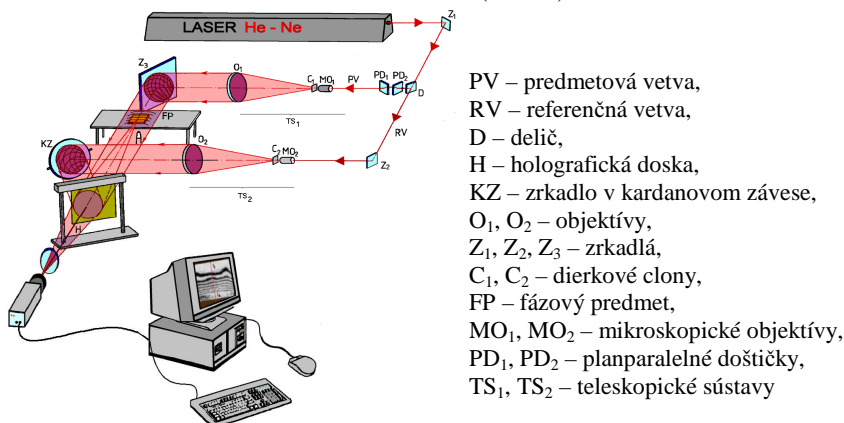
Holografická interferometria porovnáva medzi sebou dve informačné vlny, ktoré pôvodne neexistovali v tom istom čase. Tým vzniká kvalitatívne nová možnosť zohľadniť pri meraní vplyv ďalšej nezávislej veličiny – času.

1.1 PRÍSTROJOVÉ ZABEZPEČENIE

Holografia využíva interferenciu (skladanie, superpozíciu) svetla, preto vyžaduje použitie koherentných svetelných zdrojov. Zariadenie – interferometer – musí byť kompaktné, chránené proti otrasom a iným vplyvom z okolitého prostredia a vyžaduje zatemnenie pracoviska.

Ideálnym zdrojom svetelného žiarenia je **laser**. V našich experimentoch sme používali helium-neónový laser (He-Ne), ktorý vyžaruje červené svetlo s vlnovou dĺžkou $\lambda = 0,6328 \cdot 10^{-6}$ m, s kontinuálnym osvitom.

Medzi najpoužívanejšie interferometre patrí v súčasnosti holografický variant **Mach-Zehnderovho interferometra** (Obr. 1).



Obr. 1 Schéma holografického variantu jednovlnového Mach-Zehnderovho interferometra pre transparentné predmety (PIVARČIOVÁ, 2002)

Najčastejšie používané záznamové prostredie v holografii je fotografický materiál, sklenený alebo filmový, s vysokou citlivosťou a rozlišovacou schopnosťou. Nevýhodou je zdĺhavé fotochemické spracovanie záznamu.

Princíp metódy spočíva v interferencii referenčného zväzku (RV), ktorý má obvykle rovinnú vlnoplochu s predmetovým zväzkom (PV), ktorého vlnoplocha sa pri prechode meraným objektom deformuje.

Hologram (H) sa získa súčasným osvitom holografickej dosky obidvoma svetelnými zväzkami. Po spracovaní holografickej platne je možné rekonštruovať pôvodný predmetový zväzok, ktorý v reálnom čase interferuje s reálnym predmetovým zväzkom, ktorý je deformovaný.

1.2 PRINCÍP HOLOGRAFICKEJ INTERFEROMETRIE

Existuje niekoľko metód holografickej interferometrie, ktoré sa využívajú v experimentálnej praxi pre skúmanie transparentných a difúzne odrazajúcich predmetov. Z najčastejšie používaných techník (metóda kontinuálneho osvetlenia, metóda reálneho času, metóda dvoch expozícií) sa budeme podrobnejšie zaoberať len metódou dvoch expozícií (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, 2007).

Metóda dvoch expozícií je založená na interferencii dvoch rekonštruovaných vln, pričom sa zaznamená viac hologramov na jednu holografickú platňu.

Po presvetlení hologramu referenčnou vlnou, sa súčasne rekonštruujú obidve predmetové vlny, ktoré sa navzájom nepatrne líšia. Výsledkom ich interferencie po prechode optickou sústavou získame na tienidle sústavu interferenčných prúžkov.

Označme $U_1(x, y)$ komplexnú amplitúdu predmetovej vlny a $U_R(x, y)$ komplexnú amplitúdu referenčnej vlny, ktoré vytvárajú v časovom okamihu t_1 v rovine holografickej platne prvý holografický záznam. V čase t_2 sa naexponuje druhý holografický záznam vlnami $U_2(x, y)$ a $U_R(x, y)$. Pri rekonštrukcii je hologram osvetľovaný referenčnou vlnou $U_R(x, y)$. Komplexná amplitúda rekonštruovanej vlny je úmerná súčtu komplexných amplitúd $U_1(x, y)$ a $U_2(x, y)$.

V interferometrickej interpretácii vlna $U_1(x, y)$ predstavuje vlnu v rovine hologramu rozptýlenú ľubovoľným predmetom a je daná vzťahom (VEST, 1979):

$$U_1(x, y) = A(x, y) \cdot e^{-i\varphi(x, y)},$$

kde $A(x, y)$ je amplitúda svetelnej vlny.

Vlna $U_2(x, y)$ predstavuje vlnu v okamihu, kedy bol predmet určitým spôsobom zaťažený.

$$U_2(x, y) = A(x, y) \cdot e^{-i(\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y))},$$

kde $\Delta\varphi$ je zmena fázy svetelnej vlny.

Malé deformácie predmetu majú vplyv predovšetkým na fázu vlny $U_2(x, y)$ vzhľadom k fáze vlny $U_1(x, y)$.

Optická intenzita $I(x, y)$ výslednej vlny sa dá vyjadriť:

$$I(x, y) = (U_1(x, y) + U_2(x, y))(U_1^*(x, y) + U_2^*(x, y)),$$

kde $U^*(x, y)$ je vlna združená s $U(x, y)$.

Po úprave:

$$I(x, y) = 2A^2(x, y) \{1 + \cos[\Delta\varphi(x, y)]\}.$$

Tento výraz predstavuje intenzitu osvetlenia, modulovanú svetlými a tmavými interferenčnými prúžkami, zodpovedajúcimi výrazu $1 + \cos[\Delta\varphi(x, y)]$.

Zmena fázy $\Delta\varphi$ môže byť spojená s fyzikálnymi alebo mechanickými veličinami.

2 VYUŽITIE HOLOGRAFICKEJ INTERFEROMETRIE VO VYBRANÝCH TECHNICKÝCH APLIKÁCIÁCH

Metódy holografickej interferometrie sa využívajú pri sledovaní deformácií objektov, vibrácií, malých posuvov, v oblasti mechaniky tekutín, prenosu tepla, prenosu látky, v technike prostredia a hlavne ako vizualizačné metódy pri sledovaní nehomogenít v transparentných prostrediach, pre priestorový záznam častíc v tekutinách a pri sledovaní fyzikálnych polí.

Vzhľadom na požiadavky kladené na experimentálne zariadenie a jeho prevádzku, používajú sa optické vizualizačné metódy najmä pre laboratórne merania, často na špeciálne upravených modeloch.

2.1 APLIKÁCIE HOLOGRAFICKEJ INTERFEROMETRIE PRE TRANSPARENTNÉ PREDMETY

Výskum transparentných nehomogenít (teplotných, koncentračných a iných polí v priehľadných prostrediach) sa najčastejšie uskutočňuje pomocou interferometrickej metódy, ktorá umožňuje zviditeľniť nehomogenity vďaka ich odlišnému indexu lomu (OSTROVSKIJ A KOL., 1977).

Interferenčné metódy výskumu fázových predmetov sú založené na vzájomnom pôsobení dvoch koherentných vln, z ktorých jedna sa deformuje prechodom cez optickú nehomogenitu a druhá prechádza cez opticky nerušenú oblasť. Na matnici je potom možné vidieť striedajúce sa maximá a minimá intenzity svetla, tzv. **interferenčné pruhy**, z ktorých možno určiť zmeny indexu lomu v sledovanej oblasti (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, 1997).

2.1.1 Vizualizácia teplotných polí pri tepelnom zaťažení dreva

Medzi dôležité konštrukčné a stavebné materiály patrí prírodné drevo a ďalšie materiály na jeho báze. Aby sa mohli využívať, je potrebné poznať okrem ich mechanických charakteristík aj ich požiaro-technické vlastnosti, proces ich zapálenia, horenia a termického rozkladu.

Metóda holografickej interferometrie umožňuje sledovanie teplotných polí v reálnom čase. Prostredníctvom zaznamenávaného poľa indexu lomu skúmaného prostredia podáva ucelený obraz a predstavu o veľkosti a tvare teplotného poľa v danom čase a následne umožňuje analyzovať a interpretovať sledovaný jav (PIVARČIOVÁ, ČERNECKÝ, 2000), (PIVARČIOVÁ, ČERNECKÝ, 2002-1), (PIVARČIOVÁ, 2009), (PIVARČIOVÁ, ČERNECKÝ, 2011).

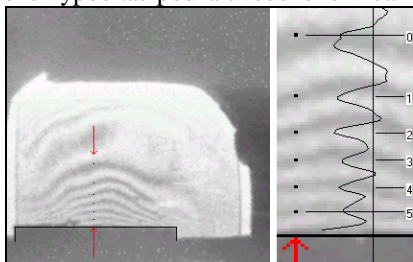
Na obrázkoch (Obr. 2) sú holografické interferogramy teplotného poľa nad ohrievaným skúšobným telesom. Interferenčné prúžky predstavujú izotermické krivky teplotného poľa.



Obr. 2 Postupnosť vytvárania prúžkov pri ohreve skúšobných telies (PIVARČIOVÁ, 2002)

Príklad vyhodnotenia teplotného profilu nad ohrievaným skúšobným telesom s určením polôh minimálnych interferenčných prúžkov a rozloženia interferenčných rádov je na obrázku Obr. 3.

Za konštantného tlaku a pri uplatnení fyzikálnych zákonitostí medzi stavovými veličinami, sa teplota v jednotlivých bodoch zvoleného rezu môže vypočítať podľa uvedeného vzťahu (PAVELEK A KOL., 2007).



Obr. 3 Vyhodnotenie holografického interferogramu teplotného poľa

$$T(x, y) = \frac{T_{\infty}}{1 + \frac{r T_{\infty} \Delta S(x, y) \lambda}{K p L}}$$

$T(x, y)$ – rozloženie teplôt,

T_{∞} – teplota vzduchu,

r – plynová konštanta,

K – Gladston-Daleova konštanta,

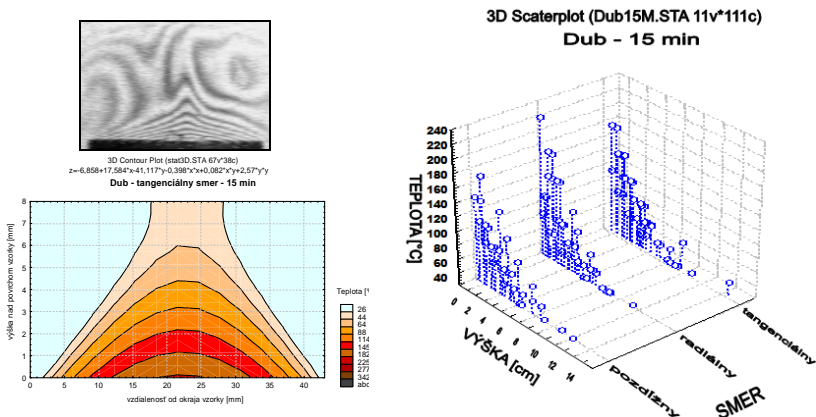
p – tlak plynu,

$\Delta S(x, y)$ – zmena interferenčného rádu,

λ – vlnová dĺžka svetla,

L – dĺžka dvojrozmerného objektu.

Na Obr. 4 je ukážka vyhodnotenia závislosti teploty od anatomického smeru a výšky nad vzorkou pre dub po 15 minútach ohrevu pre jednu konkrétnu vzorku a pre všetky vzorky.

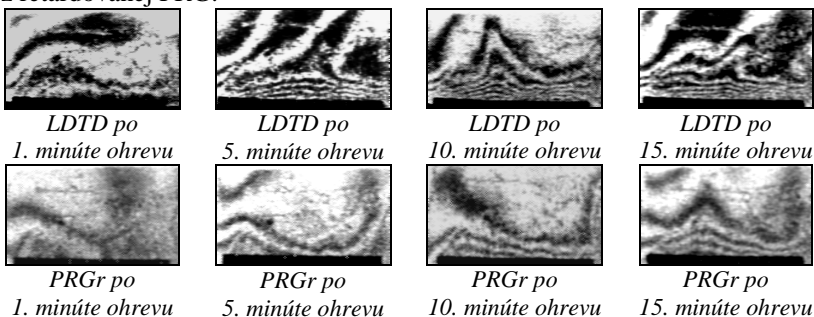


Obr. 4 Ukážka hologramu, teplotného poľa a závislosti teploty podľa textúry dreva. Vizualne mapovanie miest s rozdielnou teplotou umožňuje kontrolu ochrany pred prípadným nebezpečím, napr. umožňuje určiť pásmo nebezpečia okolo ohrievaného materiálu, aby nedošlo k prípadnému vznieteniu látok v tejto oblasti, pričom za hraničnú podmienku môžeme považovať určitú teplotu vzplanutia, vzdialenosť alebo časový interval.

2.1.2 Sledovanie požiarnej odolnosti skúšobných telies na báze dreva

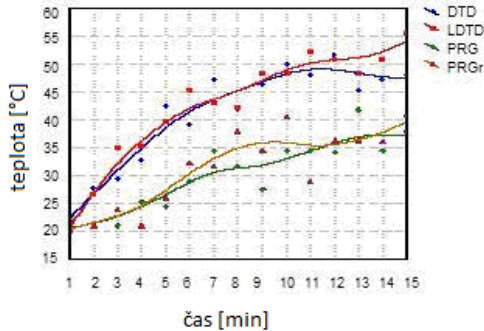
Pre sledovanie požiarnej odolnosti skúšobných telies na báze dreva boli použité materiály na báze dreva: drevotriesková doska (DTD), laminovaná drevotriesková doska (LDTD), preglejovaná doska (PRG) a preglejovaná doska retardovaná (PRGr).

Na obrázkoch (Obr. 5) sú holografické interferogramy teplotného poľa nad ohrievaným skúšobným telesom z laminovanej DTD a skúšobným telesom z retardovanej PRG.



Obr. 5 Obrazy holografických interferogramov nad ohrievanou LDTD a PRGr (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, 2002)

Teploty boli vypočítané podľa vzťahu na Obr. 3. Na Obr. 6 je zobrazená závislosť teploty nad skúšobným telesom od doby pôsobenia ohreву.



Obr. 6 Závislosť teploty nad skúšobným telesom od doby pôsobenia ohreву

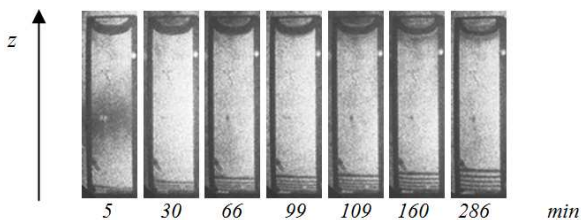
Môžeme konštatovať, že je značný rozdiel ohreву drevotrieskových a preglejovaných dosiek. Maximálna teplota nad skúšobným telesom po 15 minútach ohreву dosiahla u skúšobných telies na báze triesky až o 20–25 °C viac ako u telies so základom dyhy (PIVARČIOVÁ, ČERNECKÝ, 2002-2).

2.1.3 Vizualizácia difúzných procesov

Difúzny koeficient hmoty v kvapaline môže byť určený teoreticky alebo môže byť nájdený z dostupných experimentálnych korelácií. Takto získané hodnoty sú len približné. Ak je potrebná väčšia presnosť, mali by byť aplikované experimentálne metódy, medzi ktoré patrí aj metóda holografickej interferometrie.

V experimente bol použitý sadrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, dihydrát síranu vápenatého) z hlohoveckej tehelne. Používa sa na výrobu sadry, cementu, omietkovín a prefabrikátov. V menšom množstve sa využíva v poľnohospodárskom a farmaceutickom priemysle, pri výrobe skla a papiera. Sadrovec má aj geochemický význam, pretože sa spolu s kalcitom podieľa na množstve vápnika v prírodných vodách.

Na Obr. 7 sú zobrazené holografické interferogramy rozpúšťajúceho sa sadrovca v destilovanej vode v makrokyvete.



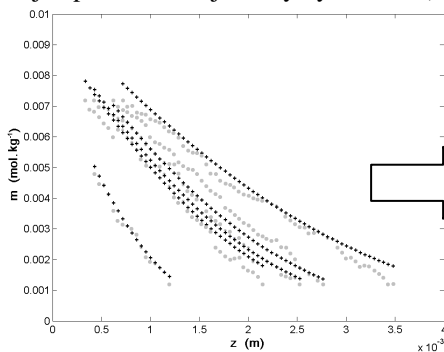
Obr. 7 Interferogramy rozpúšťajúceho sa sadrovca v destilovanej vode (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, 2013)

Na výpočet molality m pozdĺž vertikálnej súradnice z ako funkcie času t , bol použitý vzťah (CRANK, 1975):

$$m(z, t) = m^{\text{sat}} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{Dt}} \right) - \exp \left[\frac{k\beta z}{D\rho m^{\text{sat}}} + \left(\frac{k\beta}{D\rho m^{\text{sat}}} \right)^2 Dt \right] \times \operatorname{erfc} \left[\frac{z}{2\sqrt{Dt}} + \frac{k\beta}{D\rho m^{\text{sat}}} \sqrt{Dt} \right] \right],$$

kde ρ je hustota rozpúšťania, $\beta = s_r / s$ je geometrická konštanta, s je plocha úseku kolmého na transport hmoty, s_r je plocha rozpúšťacieho rozhrania, erfc je komplementárna chybová funkcia, m^{sat} je molalita rozpusteného sadrovca, D je difúzny koeficient a k je konštanta rozpúšťania.

Na Obr. 8 vidieť grafickú závislosť molality m na osi z v celej makrokyvete. Svetlé krúžky predstavujú experimentálne body, + predstavujú teoretické preloženie krivky výrazom $m(z, t)$. Hodnoty D a k boli získané preložením našej experimentálnej krivky výrazom $m(z, t)$.



$$m_{\text{sat}} = 11 \text{ mmol.kg}^{-1}$$

$$D = 2.581 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$k = 3.242 \cdot 10^{-5} \text{ mol.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Obr. 8 Molalita počas experimentu z Obr. 7

Získané hodnoty sa nepočítali ako priemerné hodnoty z množstva meraní ďaleko od povrchu látky, ako vo väčšine štandardných makroskopických experimentov, ale pomocou holografickej interferometrie sme sledovali procesy priamo na povrchu kryštálu a vypočítali hodnoty charakterizujúce mikroskopickú prenosovú rýchlosť na rozhraní sadrovec – voda (PIVARČIOVÁ A KOL., 2012).

2.2 APLIKÁCIE HOLOGRAFICKEJ INTERFEROMETRIE PRE DIFÚZNE ODRÁŽAJÚCE OBJEKTY

Od difúzne odrážajúceho predmetu sa svetlo odráža a neprechádza cez predmet. Aplikácie holografickej interferometrie pre difúzne odrážajúce objekty umožňujú výskum deformácií povrchov vplyvom vibrácií, mechanických či tepelných pôsobení a pod. a to s presnosťou až zlomku vlnovej dĺžky použitého svetla (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, DUBOVSKÁ, 1999).

Význam experimentov vzrastá v nových a netradičných oblastiach, ako je lomová mechanika, optimalizácia navrhovania, dynamické a náhodné procesy, reologické vlastnosti materiálov, vplyv nehomogénnosti materiálov, diagnostická a defektoskopická kontrola kvality materiálu, v drevárskom priemysle, na vyšetovanie rezonančných frekvencií pílových kotúčov, vnikanie rezného klina do dreva, pri stavbe hudobných nástrojov.

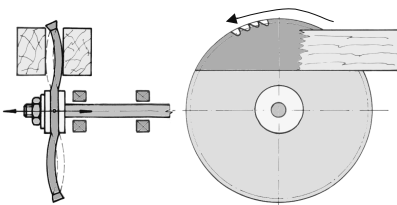
2.2.1 Sledovanie rezonančných frekvencií pílových kotúčov

Pílové kotúče v piliarskych technológiách sú vystavené meniacim sa zaťaženiám od rezných klinov, dynamických rázov, prachu a pod. Otáčaním kotúča dochádza k jeho zaťaženiu vnútornými silami (rezonančné frekvencie), ako aj vonkajšími silami (od rezného procesu). Ak sú frekvencie budiacich síl zhodné, resp. blízke rezonančným frekvenciám pílového kotúča, dochádza k jeho zvýšenému namáhaniu (SVOREŇ, JAVOREK, 1993) a môže to viesť k jeho znehodnoteniu (Obr. 9).

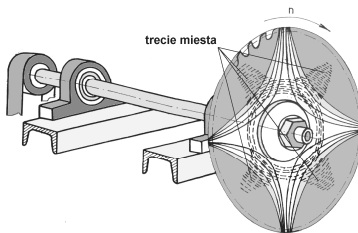
Citlivým miestom sú aj ložiská hriadeľov kotúčových píl, ktorých trvanlivosť je nižšia, ako teoretický predpoklad.

Jedným z mnohých zdrojov poškodenia ložísk je cyklické namáhanie v axiálnom smere (Obr. 9), ktoré je generované vibráciou pílového kotúča pri dosiahnutí kritických otáčok (Obr. 10).

Pre prípady rezonančného kmitania je užitočné poznať rozloženie a veľkosti amplitúd, pretože ukazujú, ktoré časti pílového kotúča sa najviac deformujú. Tvary chvenia pílového kotúča získané holografickým záznamom vyjadrujú Chladniho obrazce a závisia od veľkosti a frekvencie budiacich kmitov.

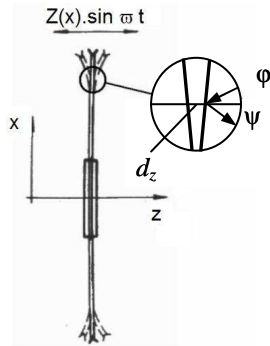


Obr. 9 Cyklické namáhanie ložiska v axiálnom smere



Obr. 10 Pílový kotúč pri kritických otáčkach

Princíp výpočtu amplitúdy d_z podľa (OSTROVSKIJ A KOL., 1988) znázorňuje Obr. 11.



$$d_z = \frac{N_i(J_0^2)\lambda}{2\pi(\cos\psi + \cos\varphi)},$$

kde

d_z – amplitúda mechanických kmitov,

$N_i(J_0^2)$ – i -ty nulový rád štvorca Besselovej funkcie J_0 ,

λ – vlnová dĺžka použitého svetla,

φ – uhol dopadu svetelného zväzku na objekt,

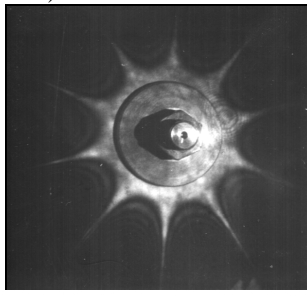
ψ – uhol odrazu svetelného zväzku k pozorovateľovi.

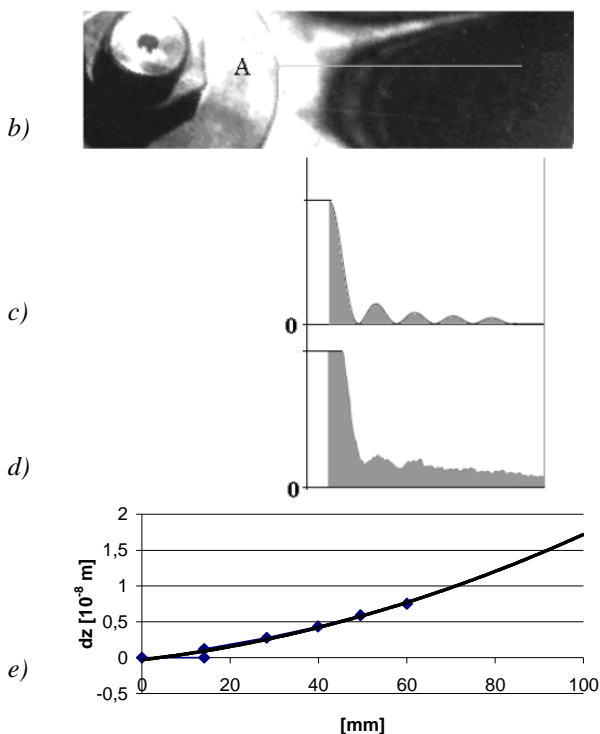
Obr. 11 Odvodenie amplitúd vibrácií pílového kotúča

Na Obr. 12 je analýza holografických interferogramov kmitania pílového kotúča, upevneného v prírubе masívneho prípravku, budeného elektromagnetickým budičom.

Detail polomeru pílového kotúča je znázornený na Obr. 12 b, na ktorom je zvýraznená čiara, z ktorej sa určili hodnoty Besselovej funkcie (Obr. 12 c), ako aj polohy interferenčných prúžkov (Obr. 12 d). Zo vzťahu pre d_z je vypočítaná a graficky znázornená výchylka kmitajúceho pílového kotúča po vyznačenej čiare (Obr. 12 e).

a)

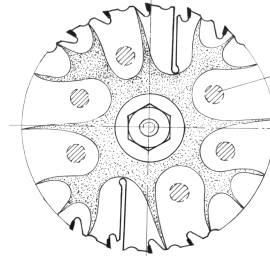
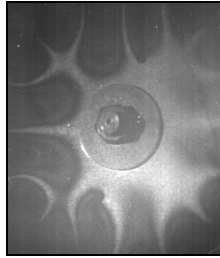




Obr. 12 Analýza rezonančných frekvencií pílového kotúča (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, 2005)

- a) rekonštruovaný holografický interferogram pri $f = 3\,600 \text{ Hz}$
- b) detail analyzovanej časti holografického interferogramu
(A – analyzovaná časť)
- c) vypočítaný priebeh Besselovej funkcie tvarov kmitania
- d) polohy interferenčných prúžkov
- e) amplitúdy kmitania pílového kotúča

Na Obr. 13 sú vyznačené možnosti úpravy pílových kotúčov za účelom zníženia amplitúd výchylek v axiálnom smere. Tieto úpravy možno uskutočniť lokálnym mechanickým predpäťm alebo vytvorením drážok.



Obr. 13 Holografický interferogram rezonančných tvarov kmitania pílového kotúča s dvoma otvormi pri $f=1\ 650\ \text{Hz}$ a možnosti úprav pílového kotúča zavedením predpätia (vyšrafované kruhové plochy)

K negatívnym dôsledkom rezonančného kmitania pílových kotúčov patrí vznik únavových trhlín v medzizubovej medzere, hlučný chod, axiálne a radiálne hádzanie pílových kotúčov, čím sa zväčšuje šírka reznej medzery, zväčšuje sa tepelné zaťaženie a vzrastá aj spotreba elektrickej energie. Správne aplikovanie analýzou získaných výsledkov v konštrukcii pílových kotúčov sa v reznom procese znižuje riziko poškodenia kotúča, zvyšuje sa jeho životnosť, zvyšuje sa presnosť rezu, zmenšuje sa tepelné zaťaženie a spotreba elektrickej energie (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, 2005).

2.2.2 Diagnostika akustických a vibračných vlastností korpusu huslí

Holografická interferometria je jednou z možných metód experimentálneho výskumu diagnostickej a defektoskopickej kontroly kvality korpusu huslí a jeho častí. Metódou dvoch expozícií boli z aspektu statiky analyzované koncertné husle s tmavohnedým lakom, ktoré sa porovnávali s „bielymi“ továrenskými nenalakovanými husľami, vyrobenými vo firme Strunal Luby, ktorých vrchné dosky boli upravované. Doska bola máčaná v toluéne za zvýšeného tlaku v ultrazvukovom poli.

Pri výskume a diagnostike korpusu huslí bolo aplikované mechanické zaťaženie od napätia strún, tepelné zaťaženie a akustické vybudenie do vibrácií (ČERNECKÝ, MARČOK, 1998).

Prvou expozíciou boli holograficky zobrazené husle vo vyladenom stave pri pôsobení všetkých strún na hornú dosku prostredníctvom kobylky silou $Q = 200\ \text{N}$, pri druhej expozícii bol zobrazený korpus pri $Q = 182\ \text{N}$.

Maximálny priehyb vzdialenosti x sa vypočíta zo vzťahu (SKALMIERSKY, 1981):

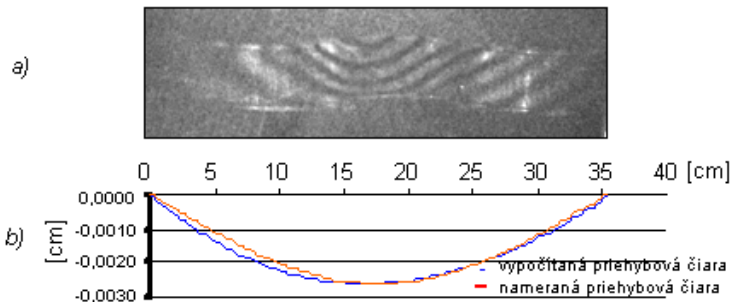
$$y(x) = \frac{Q}{kP} \left[-\frac{\sin(k(l-a))}{\sin(kl)} \sin(kx) \right] + \frac{M_0}{P} [1 - \cos(kl)] \sin(kx) +$$

$$+ \frac{Q}{kP} \left\{ \left(1 - \frac{a}{l} \right) kx - H(x-a) [k(x-a) - \sin(k(x-a))] \right\} + \frac{M_0}{P} [-1 + \cos(kx)]$$

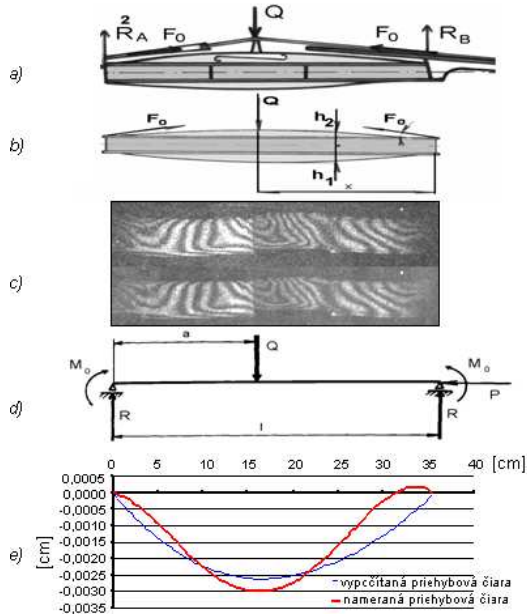
kde: $Q = 2 \cdot F \cdot \sin \alpha$; $P = F \cdot \cos \alpha$; $M_0 = h \cdot F \cdot \cos \alpha$; Q – sila pôsobiaca na kobyľku; F – ťahová sila strún; k – krivosť korpusu; M_0 – moment síl; H – Heavisidova funkcia; α , l , a , h – geometria korpusu a strún.

Pri vyhodnocovaní holografických interferogramov priehybu korpusu huslí pri pôsobení tlaku kobyľky od napätia strún sa uvažovali posunutia len v smere pôsobenia kobyľky (v smere osi y), ktoré sa porovnávali s vypočítanou priehybovou čiarou.

Už samotným kvalitatívnym rozborom štruktúry interferenčných prúžkov možno posúdiť priebeh deformácie korpusu huslí. Tvar interferenčných prúžkov na koncertných husliach (*Obr. 14*) vyrobených ručne, zodpovedá priehybovej čiare nosníka, nakoľko teoretická (vypočítaná) priehybová čiara nosníka takmer splýva s nameranou. Avšak husle vyrobené továrensky nemajú ani tvar interferenčných prúžkov podobný priehybu nosníka, ale ani smer posuvu interferenčných prúžkov (*Obr. 15*). Meranie ďalej ukázalo, že technológia stavby huslí, t.j. zavedenie predpäťí do hornej a spodnej rezonančnej dosky, ako aj hrúbky dosiek a tvar majú vplyv na priehyb korpusu huslí.



Obr. 14 Analýza statiky koncertných huslí (ČERNECKÝ, MARČOK, 1998)
a) Holografický interferogram
b) Vypočítaná a nameraná priehybová čiara

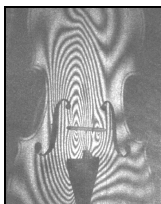


Obr. 15 Analýza statiky továrenských huslí (ČERNECKÝ, MARČOK, 1998)

- a) Pôsobenie síl na celé husle
- b) Pôsobenie síl na korpus
- c) Holografické interferogramy z dvoch pohľadov v smere osi y
- d) Zobrazenie korpusu huslí ako nosníka
- e) Vypočítaná a nameraná priehybová čiara

Metódou reálneho času sa posudzovala možnosť zviditeľnenia basového trámca. Získané výsledky, prezentované na Obr. 16 a, Obr. 16 b, ukázali vplyv basového trámca vznikom porúch interferenčného poľa pri priamom mechanickom zaťažení napínaním strún. Tieto zmeny interferenčného poľa môžu byť zapríčinené väčším prierezom basového trámca, ktorý spôsobuje aj šikmé ohýbanie korpusu, alebo malou hrúbkou vrchnej rezonančnej dosky. Príliš veľká hmotnosť basového trámca posúva formanty k nižším frekvenciám. Na kvalitnom koncertnom nástroji prudké zmeny interferenčných prúžkov nie sú zaznamenané. Tam je zrejماً vyváženosť prierezu basového trámca a hrúbky vrchnej rezonančnej dosky (Obr. 16 b). Holografickú interferometriu možno použiť ako diagnostickú a defektoskopickú metódu pre identifikáciu basového trámca, jeho uloženia a pôsobenia na vrchnú rezonančnú dosku, umiestnenia duše a jej prejav na spodnú rezonančnú dosku, odlepenia jednotlivých častí nástroja, šírenia trhlín na vrchnej a spodnej rezonančnej doske, vlastností náterových látok a

doby ich vytvrdzovania, predpätia vo vrchnej rezonančnej doske, napadnutia biologickými škodcami (červotoč, huba, atď.).



a) pri mechanickom namáhaní



b) pri kvalitnom nástroji (koncertné husle)

Obr. 16 Zviditeľnenie basového trámca (ČERNECKÝ, MARČOK, 1998)

Táto metóda sa dá aplikovať aj pre iné drevené strunové hudobné nástroje a s výhodou sa môže využívať pre riadenie kvality vo výrobnom procese, priebežnou kontrolou systematicky vybraných výrobkov a ich diagnostikovaním v laboratórnych podmienkach závodu. Keďže sa jedná o nedeštruktívne skúšky, skúšané vzorky sa môžu vrátiť do výroby, resp. sa podľa výsledkov skúšok môžu prijať opatrenia pre pokračovanie výroby.

2.3 UPLATNENIE HOLOGRAFICKEJ INTERFEROMETRIE V PROCESCH KONŠTRUKCIE, KONTROLY A RIADENIA

Každá aplikácia holografie si vyžaduje teoretické a experimentálne znalosti, špecifický prístup a skoro vždy ju možno považovať za pôvodnú metódu (LIŠKA, 1983).

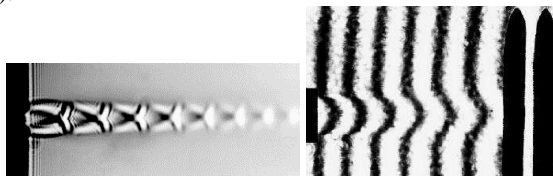
Paralelne sa s holografickou interferometriou rozvíjali aj ďalšie optické metódy (NOVÁK, 2009), ako sú napr. laserová interferometria, speckle interferometria, moiré metódy, digitálna holografia, prípadne ďalšie, ktoré často prebrali potenciálne možnosti holografickej interferometrie.

Aj preto sa uplatnenie metód holografickej interferometrie dostáva do bežnej praxe v menšom rozsahu, ako sa pôvodne očakávalo. Ale sú aj ďalšie dôvody, napríklad nutná robustnosť technického vybavenia, možnosť ovplyvnenia výsledkov vonkajšími vplyvmi (časová stálosť prostredia, teplota, vibrácie, turbulencia vzduchu, svetelné zdroje, ...), ktoré je potrebné eliminovať. Napriek týmto problémom sa metóda dostáva aj do praktického využitia, vďaka narastajúcemu počtu odborníkov s potrebným teoretickým vzdelaním, experimentálnymi skúsenosťami a technickým vybavením, i keď dominantne ostáva v priestoroch laboratórií.

V ďalšom texte sú uvedené ukážky niektorých praktických uplatnení holografickej interferometrie.

2.3.1 Zobrazenie vzduchových prúdov

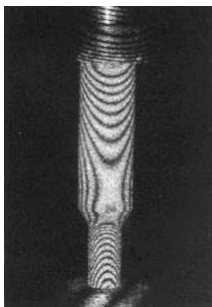
V oblasti fázových predmetov možno spomenúť využitie interferometrickej a tieňovej metódy v predvýrobnej i povýrobnej kontrole trýsk a aktívnych lamiel pneumatických tkacích strojov (LIŠKA, 1983) pre zabezpečenie spoľahlivosti prehadzovania vlákien. Autor ukázal, že na zviditeľnenie malých nehomogenít – sledovanie zmeny indexu lomu svetla, sa dá využiť Fabry-Perotov interferometer vo funkcii refraktometra pre dýzy s výtokovým otvorom 3–5 mm. Pre prífukovacie lamely s výtokovými otvormi 0,5–1,0 mm, pri ktorých sa vytvárajú optické nehomogenity menšieho rozmeru, sa ako najvhodnejšia ukázala tieňová metóda. Príklad tieňogramu a interferogramu je na *Obr. 17*. Získala sa tak informácia nielen o smere vzduchových prúdov v blízkosti výtokových otvorov, ale aj v oblastiach rozpadu vzduchových lúčov, alebo aj v miestach, v ktorých dochádza ku spájaniu vzduchového prúdu hlavnej trysky so vzduchovými prúdmi aktívnych lamiel. Zo skúšok sa zistila závislosť smeru prúdu vzduchu na tlaku, keď sa smer prúdu výrazne mení pri nižších tlakoch. Získané výsledky pomohli pri výrobe lamiel s výrazne lepšími vlastnosťami (LIŠKA, 1983).



Obr. 17 Tieňogram (vľavo) a interferogram (vpravo) vzduchového prúdu z trysky (LIŠKA, PAVELEK, 2002)

2.3.2 Deformácia vystrihovacieho nástroja

Holografická interferometria má význam pri kontrole výrobkov a nástrojov, kde umožňuje zisťovanie malých deformácií a malých posunutí tvaru predmetu s povrchom difúzne odrážajúcim svetlo. Umožňuje sledovanie rôznych vlastností a správania mechanických súčiastok. Ako príklad možno uviesť sledovanie deformácie vystrihovacieho nástroja (strižníka) valcovitého tvaru (LIŠKA, 1983). Jednoduchým kvalitatívnym rozborom série interferogramov vývoja zmien povrchu strižníka pri vzrastajúcej zaťažovacej sile bolo možné určiť kritické miesto porušenia nástroja (*Obr. 18*). V tomto prípade bolo potrebné strižník s vysokou svetelnou odrazivosťou a veľkou tuhosťou nahradiť jeho novodurovým modelom.



Obr. 18 Deformácia strižníka (LIŠKA, 2010)

2.3.3 Kontrola pneumatík

Na *Obr. 19* je holografický interferogram relatívnych deformácií povrchu pneumatiky medzi dvoma stavmi s rôznymi vnútornými pretlakmi (PAVELEK, 2002). Jedná sa o nedeštruktívnu defektoskopiю plášt'a, kedy miesta hustejších interferenčných prúžkov odhaľujú miesta vnútorných chýb pneumatiky, prejavujúcich sa lokálnymi deformáciami povrchu. Interferogram bol zhotovený na špeciálnom holografickom zariadení firmy Rottenkolber Holo-sysTem Obing, Deutschland, určenom priamo pre výstupnú kontrolu pneumatík.



Obr. 19 Mechanické deformácie pneumatík (PAVELEK, 2002)

2.3.4 Meranie vibrácií

Holografická interferometria objektov s difúznymi povrchmi našla široké uplatnenie v oblasti merania parametrov vibrujúcich povrchov. Vibrácie predstavujú časovo premenné, periodické zmeny polôh povrchov. Interferometrický výskum vibrujúcich povrchov sa vykonáva obvykle pomocou metódy jednej dlhej expozície, pozorovania v reálnom čase, alebo metódou dvoch expozícií. Príklad holografického interferogramu vibrujúcej lodnej skrutky je uvedený na *Obr. 20* použitím špeciálneho zariadenia firmy Rottenkolber Holo-sysTem Obing, Deutschland.



Obr. 20 Holografický interferogram vibrujúcej lodnej skrutky (PAVELEK, 2002)

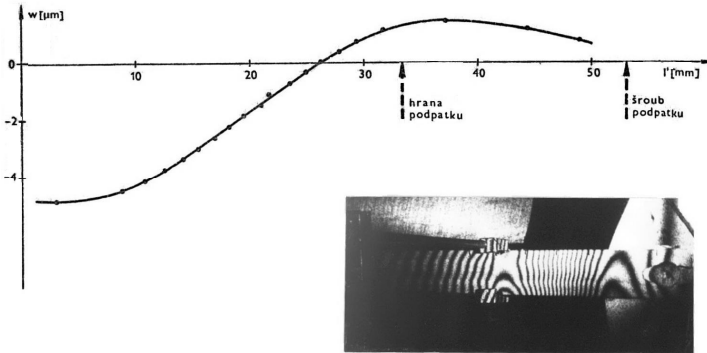
2.3.5 Sledovanie vplyvu vibrácií na quartzové rezonátory

Palubné počítače lietadiel často používajú AT-zit quartzové (kremenné) rezonátory, ktoré majú za úlohu najmä zaistiť navigačné funkcie (BOROVTSOV, 1998). Počas letu motor lietadla vytvára vibrácie v širokom rozsahu frekvencií. Tieto vibrácie môžu byť nebezpečné pre quartzové rezonátory, môžu mať nepriaznivý vplyv na ich funkčnosť a tým znižovať spoľahlivosť elektroniky ako aj bezpečnosť letu. Vyvinutý riadiaci modul s využitím holografickej interferometrie umožňuje priebežné sledovanie vplyvu vibrácií na výkyvy quartzových rezonátorov, ako dôsledok na obrysové, aj ohybové deformácie povrchu piezoelementu. Včasné rozpoznanie výskytu nebezpečných vibrácií umožňuje prevenciu výpadku kontrolných mechanizmov, možného poškodenia techniky a to počas prevádzkových testov, ako aj v bežnej doprave.

2.3.6 Priehyb klenkov

Klenok je tvarovaný prúžok z oceľového plechu používaný na výstuž klenby podrážky obuvi. Časté praskanie klenkov vyvolalo záujem výrobcu (Svit, Zlín) o zisťovanie ich deformácií (LIŠKA, 1983). Klenok bol modelovaný ako nosník s dvomi podperami, zaťažený momentom, teda ekvivalentne votknutému nosníku zaťaženému na konci silou (*Obr. 21*). Pri použití holografickej interferometrie metódou dvoch expozícií boli skúšané vzorky klenkov s opätokom, voľným koncom uchytené do čelusti ocelevej dosky a opätok bol opretý o stenu dosky. Zo série meraní vyplynulo, že pri zaťažení nevznikla výrazná lokálna zmena v štruktúre interferenčných prúžkov. Ale ukázalo sa, že tvar a počet prelisov, spôsob a miesto ich ukončenia, hrúbka a šírka klenka ovplyvňujú jeho priehyb. Ak sa o klenku uvažuje ako o nosníku, potom jeho deformácia rastie lineárne so zaťažením, kým napätie nedosiahne medzi úmernosti. K takému stavu teoreticky dochádza najskôr v mieste votknutia. K prasknutiu klenkov však dochádzalo v mieste vrubu, v blízkosti uchytenia klenka o opätok. Táto skutočnosť sa vysvetlila vznikom napätia v materiáli po vytvarovaní prelisov. Ak súčasne pôsobí aj napätie spôsobené ohybom, tak v týchto

miestach dochádza najskôr k prekročeniu medze úmernosti a neskôr k dosiahnutiu kritického napätia. Doporučilo sa zhotovenie prelisov až do konca klenkov, čím by sa odstránil jednak vrub aj napätie spôsobené tvárnením klenka.



Obr. 21 Interferogram a vyhodnotený priebeh priehybu klenka (Liška, 1983)

3 VÝHODY, NEVÝHODY HOLOGRAFICKEJ INTERFEROMETRIE

Interferometrické metódy pre transparentné objekty majú v porovnaní s inými experimentálnymi metódami nasledovné **výhody**:

- Holografická interferometria umožňuje zaznamenať celé teplotné alebo koncentračné pole použitím holografického interferometra.
- Pozorovaná oblasť nie je narušovaná snímačmi alebo sondami, ktorými sa zisťujú lokálne hodnoty v meracom priestore.
- Svetelné lúče možno považovať za úplne bez zotrvačnosti, čo umožňuje zaznamenávať okamžité deje.
- Holografická interferometria umožňuje zviditeľniť rozloženie teplotných a koncentračných polí v tvarovo zložitých predmetoch.

Výhody holograficko-interferenčných metód pri výskume difúzne odraňujúcich predmetov možno zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- Interferometrické merania umožňujú bezkontaktné meranie; priebeh deformácie je daný výhradne vlastnosťami objektu, jeho uložením (upevnením) a jeho zaťaženia.
- Holografická interferometria nekladie vysoké nároky na kvalitu zaznamenávaného povrchu objektu, preto meranie možno uskutočňovať na skúmanom objekte, netreba vyrábať fyzikálne podobné modely.
- Možnosť získania trojrozmerného zobrazenia objektu umožňuje určiť tri zložky vektora posunutia z jednej holografickej platne.
- Pozorovaná oblasť nie je narušovaná snímačmi alebo sondami.

Interferometrické metódy pre transparentné predmety aj difúzne odrážajúce predmety majú napriek svojim výhodám aj **nevýhody**:

- Zariadenie pre holografickú interferometriu je pomerne zložitú, investične náročné a obmedzené prevádzkovými podmienkami.
- Veľkosť skúmaného objektu je obmedzená veľkosťou zorného poľa objektívu.
- Väčšie deformácie vedú ku vzniku nerozlišiteľnej interferenčnej štruktúry.
- Metódu možno aplikovať v prevažnej miere v laboratórnych podmienkach.
- Experimentálne zariadenia na skúmanie objektov musia vyhovovať špecifikám holografického interferometra čo do veľkosti a konštrukcie.
- Použitím reálnej interferometrickej aparatúry treba mať na zreteli odchýlku od ideálneho interferometrického systému a túto odchýlku opraviť zavedením korekcií.
- Pri pohľade cez hologram nie je možné vidieť, či je rozdiel fázového posuvu pozitívny alebo negatívny. Pri interpretácii holografického interferogramu je potrebné vychádzať z povahy experimentu, prípadne na okrajoch použiť pomocné senzory.

ZÁVER

Experimentálne metódy zohrávajú významnú úlohu pri riešení úloh v základnom a aplikovanom výskume. Používajú sa pre overenie výsledkov teoretických výpočtov, alebo pre upresnenie matematických modelov a niekedy tiež ako jediná možnosť spôsobu riešenia úloh.

Holografická interferometria patrí medzi experimentálne metódy. Vzhľadom k požiadavkám kladeným na experimentálne zariadenie a jeho prevádzku, používa sa väčšinou len pre laboratórne merania, a to prevažne na špeciálne opticky prístupnej oblasti objektu.

Holografická interferometria je optická metóda, ktorá umožňuje zviditeľniť transparentné objekty, napomáha objasneniu fyzikálnej podstaty skúmaných javov, umožňuje upresniť a rozšíriť možnosti znázornenia fyzikálnych polí. Metódy holografickej interferometrie otvárajú nové možnosti aj pre výskum fyzikálno-mechanických charakteristík pevnosti a porušenia materiálov. Umožňujú vykonať kvalitatívne a kvantitatívne ohodnotenie parametrov charakterizujúcich mechanizmus porušenia v rôznych etapách deformácie. Výhodou tejto metódy je možnosť bezkontaktného merania a porovnávania tvarov už neexistujúcich predmetov, čo je umožnené záznamom tvaru predmetu na hologram, čím sa uchová do budúcnosti, pričom predmet nemusí reálne existovať.

V súčasnosti sú aplikácie interferenčných metód v technickej a vedeckovýskumnej praxi možné len po dôkladnom zvážení metodiky merania, s použitím holografického interferometra s digitálnym záznamom, pričom je potrebné klásť dôraz na prípravu prípravkov potrebných pre začlenenie do zostavy holografického interferometra. Aplikácie interferenčných metód sú v súčasnom období do značnej miery závislé na procese počítačového vyhodnocovania interferogramov, ktoré umožní riešenie otázok presného, rýchleho a efektívneho vyhodnocovania s potlačením subjektívnych chýb.

Holografickej interferometrii sa autorka venuje vlastnými návrhmi, realizáciou a analýzou experimentov hlavne na skúmanie transparentných predmetov (kap. 2.1).

Novej metóde výskumu požiaro-technických vlastností dreva a materiálov na báze dreva využitím metódy holografickej interferometrie sa autorka venovala od roku 1997. Výsledky práce boli podrobne popísané v (PIVARČIOVÁ, 2002).

Porovnanie teplotných polí pre rôzne druhy materiálov bolo skúmané a popísané v (PIVARČIOVÁ, 2009). Využitie holografickej interferometrie pre určenie vplyvu textúry dreva na teplotné pole bolo prvýkrát popísané v (PIVARČIOVÁ, ČERNECKÝ, 2011).

Ďalšou oblasťou výskumu bola vizualizácia a analýza difúzných procesov prostredníctvom metódy holografickej interferometrie. V rámci tohto výskumu bola nadviazaná spolupráca so Jeanom Colombanim (Laboratoire de Physique de la Matière Condensée et Nanostructures, Université Claude Bernard, France). V rámci výskumu boli overené a potvrdené metódy výskumu prestupu látky pomocou metódy holografickej interferometrie publikované v (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, 2013).

Použitie holografickej interferometrie ako kvantitatívnej meracej a bezkontaktnéj diagnostickej metódy v základnom a aplikačnom výskume do značnej miery závisí na procese vyhodnocovania interferogramov. Významný prínos autorky bol hlavne pri vyhodnocovaní holografických interferogramov a tvorbe špecializovaného softvéru vyvíjaného na základe rozboru fyzikálnych zákonitostí a analýze procesov v skúmaných dejoch a objektoch. V rámci univerzity sa programy využívajú v rámci riešenia výskumných úloh, ako aj pri tvorbe prác študentov najmä v inžinierskych a doktorandských formách štúdia.

Spôsoby vyhodnocovania holografických interferogramov sú popísané v mnohých prácach autorky, napr. v (ČERNECKÝ, PIVARČIOVÁ, 1999), (PIVARČIOVÁ, CSONGRÁDY, 2000), (PIVARČIOVÁ, ČERNECKÝ, 2006), (PIVARČIOVÁ, 2011), (PIVARČIOVÁ, KOLEDA, 2011), (BOŽEK, PIVARČIOVÁ, 2012).

Autorka bola spoluriešiteľkou viacerých grantových projektov zameraných na aplikáciu holografickej interferometrie:

GD-39: Analýza napätí a vibrácií pomocou holografie v systéme stroj – nástroj – drevo pre technické aplikácie (1997–1998), GD-45: Analýza termofyzikálnych a požiarotechnických charakteristík dreva a drevných materiálov a ich vplyvu na rozvoj (1998), GD 1/4038/97: Výskum interakcie v systéme Stroj – Nástroj – Drevo pre technické aplikácie v lesníctve (1999), GD-65 1/7570/20: Hodnotenie požiaro-technických charakteristík dreva na báze fyzikálnych veličín (2000), GD-78 1/8120/01: Integrácia variabilných experimentálnych výstupov termických degradačných zmien v dreve (2001–2003), GD 1/9383/02: Štúdium fyzikálnych vlastností vybraných technických materiálov so zameraním na priemyselné využitie pomocou holografie (2002–2003), VEGA 1/0483/08: Sledovanie účinnosti ekologických hasiacich látok v prostredí drevárskych prevádzok s trvalým nebezpečenstvom vzniku požiaru a výbuchu (2008–2009), VEGA 1/0498/10: Aplikácia holografickej interferometrie pri skúmaní medznej vrstvy v zariadeniach na prechod tepla (2010–2011).

V práci sú prezentované niektoré nové spôsoby využitia metód holografickej interferometrie v technických, najmä drevárskych aplikáciách, ku ktorým autorka prispela hlavne analýzou a pôvodnými metódami vyhodnocovania holografických interferogramov.

LITERATÚRA

1. BOROVTSOV, P. T. (1998): Mechanical resonance definition of AT-ZIT Quartz resonators by holographic module. In: IEEE International frequency control symposium, 1998, s. 934–937
2. BOŽEK, P. – PIVARČIOVÁ, E. (2012): Registration of holographic images based on integral transformation. In Computing and Informatics, Vol. 31, 2012, No. 6+, pp. 1369–1383. ISSN 1335–9150. Impact Factor: 0.239.
3. CRANK J. (1975): The Mathematics of Diffusion. Oxford University Press, Oxford 1975
4. ČERNECKÝ, J. – MARČOK, M. (1998): Aplikácia holografickej interferometrie vo výskume vibračných a akustických vlastností hnutí. Vedecké štúdie. Technická univerzita vo Zvolene, 1998, 74 s.
5. ČERNECKÝ, J. – PIVARČIOVÁ, E. (1997): Aplikácia holografickej interferometrie pri zviditeľňovaní teplotných polí. Vedecké štúdie 3/1997/B. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1997. 74 s. ISBN 80–228–0654–4
6. ČERNECKÝ, J. – PIVARČIOVÁ, E. (1999): Metódy vyhodnocovania interferogramov deformovaných telies. In: Technické vzdelanie ako súčasť všeobecného vzdelania: Zborník referátov z medzinárodnej vedecko-odbornej konferencie. Banská Bystrica: Univerzita Mateja Bela, 1999. s. 161–164. ISBN 80–8055–292–4
7. ČERNECKÝ, J. – PIVARČIOVÁ, E. (2001): Zaujímavé vlastnosti hologramov. In: DIDMATTECH 2001: Zborník referátov z medzinárodnej vedeckej konferencie. Radom (Poľsko): Instytut Technologii Eksploatacji, 2001. s. 115–117. ISBN 83–7204–221–7
8. ČERNECKÝ, J. – PIVARČIOVÁ, E. (2002): Požiarna odolnosť skúšobných telies na báze dreva. In: Nové trendy v statike a dynamike stavebných konštrukcií: Zborník referátov z medzinárodnej konferencie, Bratislava: Slovenská Technická univerzita, 2002. s. 165–170. ISBN 80–227–1790–8
9. ČERNECKÝ, J. – PIVARČIOVÁ, E. (2005): Štúdium rezonančných frekvencií pílových kotúčov. In: Manufacturing engineering Výrobné inžinierstvo, číslo 4, ročník IV. 2005. s. 11–13. ISSN 1335–7972
10. ČERNECKÝ, J. – PIVARČIOVÁ, E. (2007): Possibilities and prospects of holography. Izhevsk: State Technical University (Russia), 2007. 124 pg. ISBN 978–5–7526–0303–7
11. ČERNECKÝ J. – PIVARČIOVÁ E. (2013): Vizualizácia a analýza difúzných procesov na fázovom rozhraní minerál – voda. Chemické listy 04/2013.

- Impact Factor: 0,529. ISSN 1213–7103, 0009–2770 (printed), 1803–2389 (CD-ROM)
12. ČERNECKÝ, J. – PIVARČIOVÁ, E. – DUBOVSKÁ, R. (1999): Holografická interferometria a jej aplikácie na deformované telesá. In: Acta Universitatis Matthiae Bellii, Technická výchova, No 2. Banská Bystrica: Univerzita Mateja Bela, 1999. s. 5–65. ISBN 80–8055–336–X
 13. ČERNECKÝ, J. – PIVARČIOVÁ, E. – DUBOVSKÁ, R. (2003): Holografia a jej technické aplikácie. Radom (Poľsko), 2003. 66 s. ISBN 83–7204–352–3
 14. LIŠKA, M. (1983): Metody koherenční optiky ve srojírenské metrologii. Doktorská disertační práce. VÚT v Brně, 1983
 15. LIŠKA, M. (2010): Lasery – znovuzrození optiky. Výzkum aplikací laserů na VUT v Brně, Československý časopis pro fyziku, Vol. 60, (2010), No. 4–5, pp. 229–237, ISSN 0009–0700
 16. LIŠKA, M. – PAVELEK, M. (2002) Mechanika tekutin, b) Výzkum proudění z trysky. 2002. Dostupné on-line: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/cpav6.htm> (cit. febr. 2013)
 17. NOVÁK, J. (2009): Bezkontaktní měřící metody v experimentální mechanice, 2009. Dostupné on-line: <http://departments.fsv.cvut.cz/k102/doktorske-studium/bezkontaktni-merici-metody-v-experimentalni-mechanice?prezentace> (cit. apríl 2013)
 18. OSTROVSKIJ, J. J. – BUTUSOV, M. M. – OSTROVSKAJA, V. (1977): Golografičeskaja interferometrija. Moskva Nauka, 1977, 400 s.
 19. OSTROVSKIJ, J. I. – ŠČEPINOV, V. P. – JAKOVLEV, V. V. (1988): Golografičeskije interferencionnye metody izmerenia deformacij. Nauka, Moskva 1988, 246 s.
 20. PAVELEK, M. (2002): Optika. VUT Brno, 2002. Dostupné on-line: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0100.htm> (cit. febr. 2013)
 21. PAVELEK, M. – JANOTKOVÁ, E. – ŠTETINA, J. (2007): Vizualizační a optické měřící metody. Vysoké učení technické v Brně, 2007. Dostupné on-line: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/>
 22. PIVARČIOVÁ, E. (2002): Možnosti vizualizácie a analýzy teplotných polí pri termickom zaťažení dreva. Dizertačná práca. Zvolen, 2002, 92 s. + 186 s. prílohy
 23. PIVARČIOVÁ, E. (2009): Teplotné pole materiálu. Strojárstvo/Strojírnenství 10/2009, s. 74/4. ISSN: 1335–2938
 24. PIVARČIOVÁ, E. (2011): Analýza obrazov holografických interferogramov teplotných polí. In: Energetické stroje a zařízení, Termomechanika & Mechanika tekutin. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. ISBN: 978–80–261–0004–1

25. PIVARČIOVÁ E. – CSONGRÁDY T. (2000): Software for temperature fields analysis. In: *Algorithmy 2000: 15th conference on Scientific Computing*. Vysoké Tatry – Podbanské; Bratislava: Slovak University of Technology, 2000. s. 330–340. ISBN 80–227–1391–0
26. PIVARČIOVÁ, E. – ČERNECKÝ, J. (2000): Analysis of temperature fields in wood combustion. In: *Wood & Fire Safety: Zborník z medzinárodnej vedeckej konferencie*. Štrbské Pleso: Technická univerzita vo Zvolene, 2000. s. 259–264. ISBN 80–228–0774–5
27. PIVARČIOVÁ, E. – ČERNECKÝ, J. (2002-1): Equipment for the temperature fields study. In: *Fire and Explosion protection: 8. Yugoslav and 5. International conference, Novy Sad (Juhoslávia): Viša technická škola* Institut za Technologiju Zaštite, 2002. s. 45–50. COBISS-ID 181496327
28. PIVARČIOVÁ, E. – ČERNECKÝ, J. (2002-2): Applying fire retarders to spruce testing bodies. In: *Fire Engineering Proceedings: 1. International Conference*, Lučenec: Technická univerzita vo Zvolene, 2002. s. 295–300. ISBN 80–89029–51–5
29. PIVARČIOVÁ, E. – ČERNECKÝ, J. (2006): Utilisation of Computers in Holographic Interferometry. In: *Obzory matematiky, fyziky a informatiky*, 4/2006, ročník 35, s. 26–32. ISSN 1335–4981
30. PIVARČIOVÁ, E. – ČERNECKÝ, J. (2011): Wood texture influence on temperature fields. In: *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22. International DAAAM symposium „Intelligent manufacturing & automation: Power of knowledge and creativity“*. Vienna (Austria), 2011. ISBN 978–3–901509–83–4. ISSN 1726–9679. p. 1069–1070
31. PIVARČIOVÁ, E. – ČERNECKÝ, J. – KONIAR, J. (2012): Vizualizácia a vyhodnotenie obrazov koncentračných polí. In: *Acta Facultatis Technicae XVII*, Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2012 (2), s. 101–107. ISSN 1336–4472
32. PIVARČIOVÁ, E. – KOLEDA, P. (2011): Impact of skeletonization methods on accuracy of digital holograms evaluation. *Scientific Papers of the University of Pardubice, Series D, No. 19 (1/2011), Vol. XVI*. Pardubice, 2011, s. 181–187. ISSN 1211–555X
33. SKALMIERSKY, B. (1981): The Construction of Old Italian Violins: A Tentative Explanation. *Bulletin de L' Académie Polonaise des sciences*, No. 9–10, 1981, s. 175–181
34. SVOREŇ J. – JAVOREK, L. (1993): Pracovné otáčky pre zabezpečenie dynamickej stability pílových kotúčov. In: *Drevoobrábacie nástroje v praxi*. LIGNUMEXPO Nitra '93, Nitra, 1993
35. VEST, Ch. M. (1979): *Holographic interferometry*. New York, John Wiley, 1979

MGR. ELENA PIVARČIOVÁ, PHD.

OSOBNÉ INFORMÁCIE

Meno Mgr. Pivarčiová Elena, PhD.
Pracovisko Technická univerzita vo Zvolene,
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Katedra informatiky a automatizačnej techniky
Trvalý pobyt V. P. Tótha 10, 960 01 Zvolen, Slovensko
Národnosť slovenská
Dát. narodenia 12. august 1967
Kontakt 0903/140405, pivarciova@tuzvo.sk

PRACOVNÉ SKÚSENOSTI

Od r. 2002 Technická univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej
a výrobnjej techniky, Katedra informatiky a automatizačnej techniky
pedagóg: výpočtová technika, informačné technológie, programovanie
1996–2002 TU vo Zvolene, Drevárska fakulta, Katedra požiarnej ochrany
pedagóg: výpočtová technika a informačné technológie
1996 TU vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Katedra výpočtovej techniky a automatizácie
pedagóg – externe: cvičenia výpočtovej techniky
1991–1996 Gymnázium a Obchodná akadémia v Krupine
stredoškolská učiteľka: informatika, matematika, biológia
1985–1986 Vysoká škola lesnícka a drevárska, Zvolen
operátorka

VZDELANIE

1996–2002 Technická univerzita vo Zvolene, Drevárska fakulta
doktorandské štúdium – študijný odbor: Technológia spracovania dreva
ukončené dizertačnou skúškou
Téma dizertačnej práce: Možnosti vizualizácie a analýzy teplotných polí pri
termickom zaťažení dreva
1992–1995 Vysoká škola pedagogická v Nitre
rozširujúce štúdium informatiky
ukončené Štátnou záverečnou skúškou
1986–1991 Pedagogická fakulta v Nitre
študijný odbor: matematika – biológia
ukončené Štátnou záverečnou skúškou
1981–1985 Gymnázium vo Zvolene
ukončené maturitnou skúškou

Autorka publikovala 3 monografie (Rusko, Poľsko, Slovensko), 30 článkov v časopisoch, z toho 2 články v impaktovaných časopisoch, približne 70 článkov v zborníkoch z konferencií.

Autorka má približne 100 citácií, z toho medzinárodné databázy (4): Web of Science (1), EBSCO (3); recenzované časopisy (32), zahraničné zborníky (4).