

Experimentální **A**nalýza **N**apětí **2005**

NON-CONTACT MEASUREMENT OF SPECIFIC ELONGATION OF THE RUBBER SPECIMEN BY MEANS OF PROPERTIES OF SPECKLE CORRELATION

BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ POMĚRNÉHO PRODLOUŽENÍ VZORKU GUMÁRENSKÉ PRYŽE VYUŽITÍM KORELAČNÍCH VLASTNOSTÍ POLÍ KOHERENČNÍ ZRNITOSTI

Petra Wagnerová ¹, Pavel Horváth ², Petr Šmíd ³, Miroslav Hrabovský ⁴

This paper includes the description of non-contact measurement of specific elongation of the rubber specimen by means of speckle correlation. The basis of this method has been given by I. Yamaguchi, who firstly studied the possibility of the non-contact measurement of components of the small deformation tensor of an elementary area of the object surface using the statistical properties of speckle field.

The theory of this method is briefly described and important equations are presented. Suitable experimental set-up of the measurement of specific elongation is outlined. The resolution of this method depends on geometrical configuration of the experimental set-up therefore a brief analysis of the measurement sensitivity is done. Concrete measurement, where the used investigated object is a rubber specimen commonly used in rubber making industry, is realised and achieved results are presented.

Keywords

speckle, specific elongation, correlation

Klíčová slova

koherenční zrnitost, poměrné prodloužení, korelace

Úvod

Velký zájem o nedestruktivní měření deformace předmětu vede k úsilí najít nové metody pro řešení tohoto problému. Jako velmi užitečné a v dnešní době i velmi moderní se jeví využít dobře známého optického jevu nazývaného koherenční zrnitost [1, 2] (z anglického „speckle“). Výhodným se ukazuje především využití statistických vlastností pole koherenční zrnitosti. Tuto myšlenku použil a realizoval v praxi I. Yamaguchi pro měření poměrného prodloužení nekovového (polymerový film) a kovového (hliník a mosaz) vzorku metodou

¹ Mgr. Petra Wagnerová: tel.: +420-5-85634284, e-mail: wagnerov@optnw.upol.cz

² Mgr. Pavel Horváth: tel.: +420-5-85631569, e-mail: horvath@optnw.upol.cz

³ Mgr. Petr Šmíd, Ph.D.: tel.: +420-5-85631575, e-mail: smid@optnw.upol.cz

⁴ prof. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc.: tel.: +420-5-85631501, e-mail: hrabovsky@optnw.upol.cz

korelace polí koherenční zrnitosti [3, 4]. V těchto člancích lze také nalézt pojem tenzometr na bázi koherenční zrnitosti (z anglického „speckle strain gauge“).

Metoda korelace polí koherenční zrnitosti popsaná v tomto příspěvku je založena na skutečnosti, že vzniklé pole koherenční zrnitosti, detekované kdekoli v prostoru před difúzně odrazným předmětem, se pohybuje a mění svoji strukturu v závislosti na deformaci zkoumaného předmětu (uvvažujeme pouze malou deformaci). Znalost vlastností pole koherenční zrnitosti pak zpětně umožňuje studovat informace o stavu povrchu předmětu. Průkopnickou studii zabývající se popisem šíření pole koherenční zrnitosti a následné využití posuvu a dekorelace tohoto pole k analýze deformace předmětu provedl I. Yamaguchi [5].

Prezentovaná měřicí metoda využívá moderní optoelektronické detekční prvky a statistické vyhodnocení naměřených hodnot pomocí funkce vzájemné korelace dvou souborů intenzit, které představují vzorky polí koherenční zrnitosti naměřených před a po deformaci předmětu. Tato funkce nabývá svého maxima pro určitou vzdálenost odpovídající právě hledanému posuvu pole koherenční zrnitosti. Vypočítané posunutí je potom využito pro stanovení jednotlivých složek tenzoru malé deformace, který popisuje stav deformace elementární plošky na povrchu předmětu [5, 6].

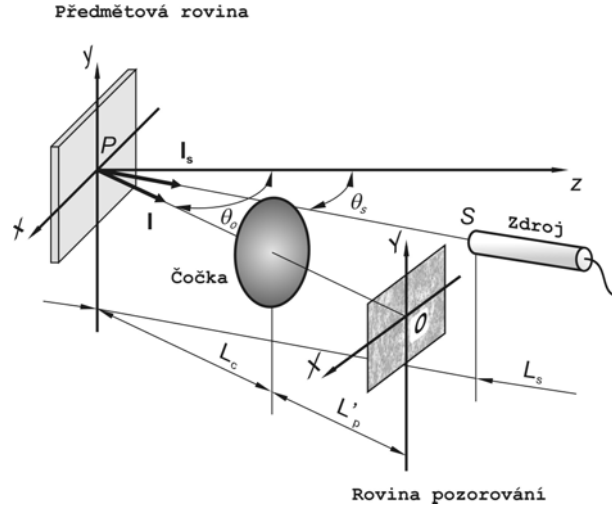
Cílem tohoto příspěvku je seznámit čtenáře s metodou korelace polí koherenční zrnitosti pro měření poměrného prodloužení předmětu. Příspěvek přitom navazuje na již publikované práce zabývající se aplikací metody pro měření rotace a translace (statické a dynamické) předmětu [7, 8].

V příspěvku je obsažen stručný teoretický popis experimentu včetně nezbytných rovnic. Konkrétní experimentální uspořádání je přitom navrženo na základě provedené analýzy rozlišení měření. Poté je vysvětlen průběh realizace experimentu včetně uvedení dosažených výsledků měření poměrného prodloužení předmětu představovaného vzorkem gumárenské pryže.

Teoretický základ

V této kapitole si představíme vhodné geometrické uspořádání pro měření jednotlivých komponent tenzoru malé deformace a modifikované uspořádání pro měření poměrného prodloužení ε_{xx} . Dále uvedeme vztahy umožňující stanovit požadované složky tenzoru malé deformace, přičemž budeme vycházet z [2, 4, 5, 6].

Uspořádání podle obr. 1 se ukázalo být výhodným pro pozorování struktury pole koherenční zrnitosti. Zkoumaný difúzně odrazný předmět je umístěn v rovině (x, y) a je osvětlen úplně polarizovaným a koherentním svazkem vycházejícím z bodového zdroje S . Mezi rovinou pozorování (X, Y) a předmětovou rovinou (x, y) je umístěna tenká čočka s ohniskovou vzdáleností f' . Použití optického systému a tedy měření v obrazovém poli umožňuje podle [2, 6] dosáhnout větší rozlišovací schopnosti měřicí metody na rozdíl od měření ve volném poli. Dále uvvažujeme, že šíření světla po odrazu je popsáno s využitím Fresnelovy aproximace a komplexní amplituda světla má v každém bodě roviny pozorování (X, Y) gaussovské rozdělení s nulovou střední hodnotou.



Obr. 1 Geometrické uspořádání vhodné pro měření složek tenzoru malé deformace v obrazovém poli.

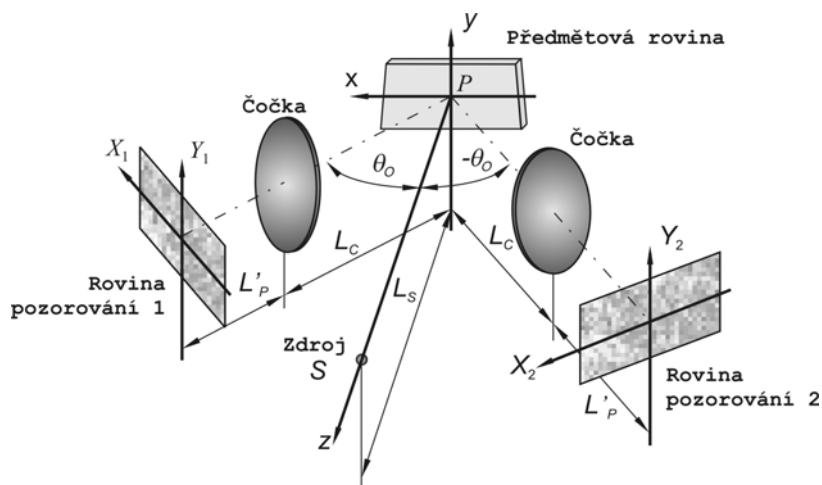
V souladu s geometrickým uspořádáním na obr. 1 pak mohou být odvozeny následující rovnice dávající do souvislosti posuv pole koherenční zrnitosti a složky tenzoru malé deformace [5, 6, 9]

$$\begin{aligned}
 -\frac{A_X f'}{L'_p - f'} = & -a_x \left[\frac{L_c (L'_p - f') - L'_p f' \cos^2 \theta_s}{L_s (L'_p - f')} \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_o} + \cos \theta_o \right] \\
 & + a_z \left[\frac{L_c (L'_p - f') - L'_p f' \cos \theta_s \sin \theta_s}{L_s (L'_p - f')} \frac{\sin \theta_s}{\cos \theta_o} \right] + a_z \sin \theta_o \\
 & + \left(L_c - \frac{L'_p f'}{L'_p - f'} \right) \left[\varepsilon_{xx} \left(\frac{\sin \theta_s}{\cos \theta_o} + \operatorname{tg} \theta_o \right) - 2\Omega_y \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_o} + 1 \right) \right],
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 -\frac{A_Y f'}{L'_p - f'} = & -a_y \left[\frac{L_c (L'_p - f') - L'_p f'}{L_s (L'_p - f')} + 1 \right] \\
 & + \left(L_c - \frac{L'_p f'}{L'_p - f'} \right) \left[(\varepsilon_{xy} - \Omega_z) (\sin \theta_s + \sin \theta_o) + 2\Omega_x (\cos \theta_s + \cos \theta_o) \right].
 \end{aligned} \tag{2}$$

Objasněme si nyní význam jednotlivých veličin v rovnicích (1) a (2). A_X , A_Y jsou složky vektoru posunutí pole koherenční zrnitosti ve směru os X a Y , které určujeme pomocí funkce vzájemné korelace intenzit polí koherenční zrnitosti zaznamenaných před a po deformaci předmětu v rovině pozorování, θ_o , θ_s jsou úhly směru pozorování a osvětlení, L_s je vzdálenost bodového zdroje S od zkoumaného předmětu, L_c , respektive L'_p , jsou vzdálenosti tenké čočky od předmětové roviny, respektive roviny pozorování, f' je ohnisková vzdálenost tenké čočky

a (a_x, a_y, a_z) , $(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$, ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy} jsou složky tenzoru malé deformace popisující translaci, rotaci a vlastní deformaci zkoumaného elementu plochy povrchu předmětu. Složky ε_{xx} , ε_{yy} přitom představují poměrné prodloužení ve směru os x , y a ε_{xy} odpovídá smyku.



Obr. 2 Geometrické upořádání s jedním zdrojem osvětlení a dvěma detektory pro stanovení poměřeného prodloužení ε_{xx} v obrazovém poli.

Dále se zaměříme na určení složky pružné deformace ε_{xx} , tedy poměřeného prodloužení ve směru osy x . Pro její stanovení se jeví jako výhodné užití symetrických upořádání buď s jedním směrem osvětlení a dvěma směry pozorování (obr. 2) anebo s jedním směrem pozorování a dvěma směry osvětlení [2, 4]. Experimentálně výhodnější je přitom geometrické uspořádání s použitím jednoho zdroje osvětlení a dvou detektorů, kde úhly pozorování jsou θ_o a $-\theta_o$. Z důvodů uvedených výše uvažujeme opět měření v obrazovém poli a proto mezi předmět a každý detektor umístíme tenkou čočku s ohniskovou vzdáleností f' .

S využitím experimentálního uspořádání na obr. 2 je možné rovnici (1) upravit do tvaru

$$\Delta A_X = A_X(\theta_s, \theta_o) - A_X(\theta_s, -\theta_o) = -2\varepsilon_{xx} \operatorname{tg} \theta_o \left(L_c \frac{L'_p - f'}{f'} - L'_p \right), \quad (3)$$

kde veličina ΔA_X představuje rozdíl složek vektorů posunutí polí koherenční zrnitosti ve směru os X_1 a X_2 detekovaných na obou kamerách.

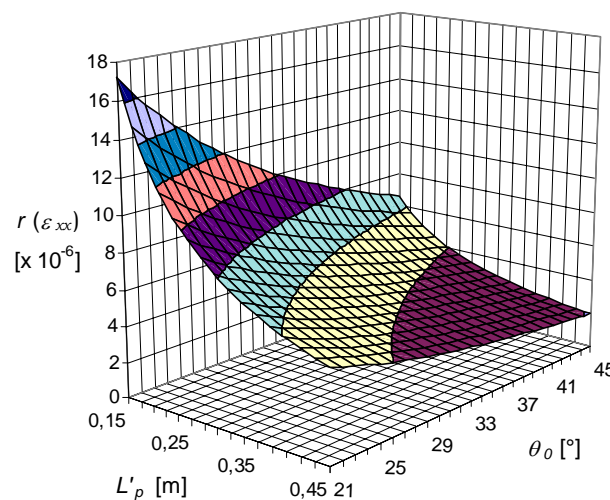
Zde je důležité poznamenat, že uspořádání sestavy podle obr. 2 umožňuje odvodit vztah pro poměrné prodloužení ε_{xx} , aniž by se musely brát v úvahu další složky tenzoru malé deformace, neboť tyto se během odvození samy eliminují s výjimkou translační komponenty a_z [3, 10]. Jelikož předpokládáme, že při procesu měření složky ε_{xx} je translace ve směru osy z zanedbatelná, můžeme pro jednoduchost složku a_z ve vztahu (3) zanedbat.

Experiment

Rozlišení a nejistota měření

Analýza rozlišení a nejistoty měření je nedílnou a velmi důležitou součástí měření. Podle rovnice (3) rozlišení i nejistota měření závisí na geometrických (L_c, L'_p, θ_0) a optických (f') parametrech konkrétní použité experimentální sestavy. Nezanedbatelný vliv na rozlišení měření má také rozlišení použitého detektoru, konkrétně vzdálenost středů dvou sousedních aktivních bodů, tzv. pixelů. Je zřejmé, že z tohoto důvodu budeme uvádět velikost veličiny ΔA_X v počtech pixelů (px).

Pro analýzu rozlišení měření lze použít následující rozsahy zmíněných parametrů: $f' = 19,96$ mm, $\Delta A_X = 1$ px, $\theta_0 \in (20; 45)^\circ$, $L'_p \in (0,15; 0,45)$ m, $L_c = 0,11$ m, které jsou zvoleny s ohledem na praktickou realizovatelnost v optické laboratoři.



Obr. 3 Grafické znázornění rozlišení měření poměrného prodloužení $r(\varepsilon_{xx})$ pro použité geometrické uspořádání podle obr. 2, pro $\Delta A_X = 1$ px, $L_c = 0,11$ m, $f' = 19,96$ mm.

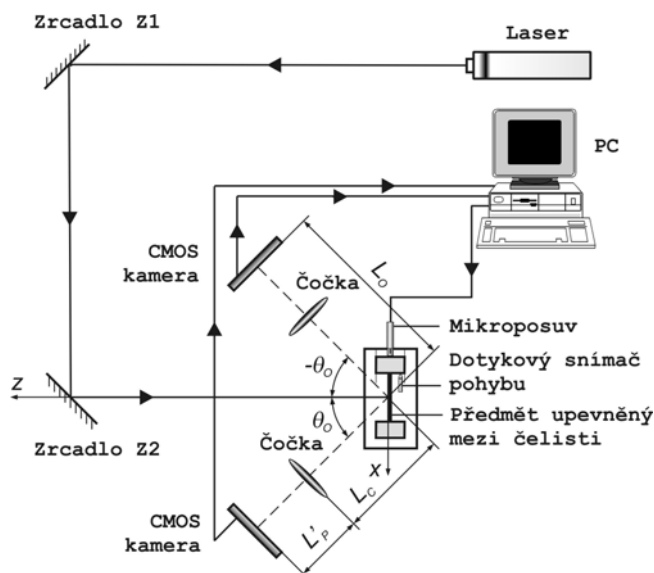
Na obr. 3 je znázorněna závislost rozlišení poměrného prodloužení $r(\varepsilon_{xx})$, pro geometrické uspořádání podle obr. 2, na úhlu pozorování θ_0 a na vzdálenosti tenké čočky od detektoru L'_p , při minimální detekované hodnotě rozdílu složek posuvů polí koherenční zrnitosti $\Delta A_X = 1$ px, vzdálenosti čočky od předmětu $L_c = 0,11$ m a ohniskové vzdálenosti čočky $f' = 19,96$ mm. Z vynesené závislosti na obr. 3 je zřejmé, že naměřená hodnota poměrného prodloužení klesá pro zvětšující se úhel směru pozorování θ_0 a zvětšující se vzdálenost L'_p tenké čočky od detektoru. Z toho dále plyne, že s rostoucím úhlem θ_0 narůstá rozlišovací schopnost této měřicí metody.

Na základě provedené analýzy rozlišení měření, s ohledem na praktickou realizovatelnost při požadavku maximální rozlišovací schopnosti metody a vyhovující hodnoty nejistoty měření, volíme v následujícím experimentu úhel směru pozorování $\theta_0 = 45^\circ$ a vzdálenost $L'_p = 0,178$ m. Protože budeme měřit hodnotu poměrného prodloužení o velikosti 30×10^{-6} , což odpovídá posuvu polí koherenční zrnitosti o $\Delta A_X = 6$ px, lze stanovit příslušnou relativní nejistotu měření $\rho_{\varepsilon_{xx}}$ pod 6%.

Návrh a průběh experimentu

Experimentální sestava pro měření poměrného prodloužení ε_{xx} ve směru osy x navrhnutá podle obr. 2 je znázorněna na obr. 4. Koherentní svazek z He-Ne laseru dopadá kolmo na povrch studovaného předmětu umístěného v předmětové rovině optických systémů, tvořených čočkou o ohniskové vzdálenosti $f' = 19,96$ mm, orientovaných symetricky pod úhlem $\theta_0 = 45^\circ$ vzhledem k dopadajícímu laserovému svazku. Poloha čoček je určena jejich vzdáleností $L_c = 0,110$ m od předmětu. Zkoumaným předmětem je předepjatý vzorek černé pryže používané běžně v gumárenském průmyslu, jehož původní délka, šířka a tloušťka jsou 118,3 mm, 6,6 mm, 2,1 mm. Pryž je na obou koncích upevněna do dvou ozubených čelistí, z nichž jedna je pevná a druhá pohyblivá vlivem působení elektronického mikroposuvu. Pohybem těchto čelistí se pryž natahuje a smršťuje v závislosti na směru pohybu. Velikost natažení se kontroluje elektronickým dotykovým snímačem posuvu, který je v přímém kontaktu s pohybuující se čelistí. Dopadající svazek je pryží odražen a rozptýlen, vzniklé pole koherenční zrnitosti je detekováno CMOS kamerami umístěnými ve vzdálenosti $L_o = 0,288$ m od předmětu. Maticové CMOS kamery mají rozlišení 1288×1032 pixelů. Velikost pixelu je $7,5 \mu\text{m} \times 7,5 \mu\text{m}$.

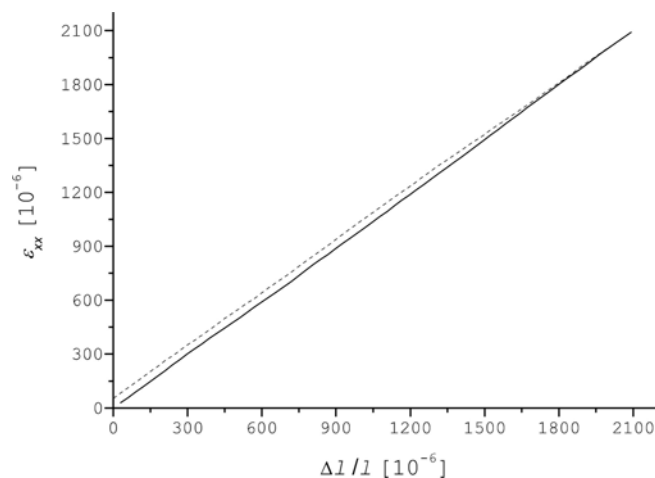
Samotný měřicí proces se skládá ze dvou fází měření. V první je pryž natahována elektronickým mikroposuvem konstantní rychlostí $11,4 \mu\text{m/s}$ a ve druhé je pryž smršťována do původního stavu stejnou rychlostí. V každé fázi je realizováno 70 měření s frekvencí snímání kamer 4 Hz. Maximální poměrné prodloužení volíme o velikosti 2100×10^{-6} což odpovídá natažení o $200 \mu\text{m}$. Volbou rychlosti elektronického mikroposuvu a frekvence snímání kamer volíme velikost poměrného prodloužení v jednom kroku, kterou chceme naměřit. V našem případě je získáno poměrné prodloužení o velikosti 30×10^{-6} v každém ze 70 měření.



Obr. 4 Navržená experimentální sestava pro měření poměrného prodloužení ε_{xx} .

Výsledky experimentu a diskuse

Na obr. 5 jsou porovnány hodnoty získané námi užitou metodou korelace polí koherenční zrnitosti (tenzometrem na bázi koherenční zrnitosti) s výsledky získanými klasicky s využitím elektronického dotykového snímače posuvu. Na horizontální ose je vynesena hodnota poměrného prodloužení $\Delta l/l$, kde Δl je přírůstek délky vzorku a l je délka vzorku. Tato hodnota je získána pomocí dotykového snímače posuvu. Na vertikální ose je vynesena hodnota poměrného prodloužení ε_{xx} , která je naměřena prezentovanou metodou korelace polí koherenční zrnitosti. Spojitá čára na obr. 5 přísluší hodnotám získaným při natahování vzorku pryže. Tečkovaná čára přísluší hodnotám získaným při smršťování vzorku pryže do výchozího stavu.



Obr. 5 Porovnání poměrného prodloužení ε_{xx} vzorku pryže získaného tenzometrem na bázi koherenční zrnitosti s poměrným prodloužením $\Delta l/l$ stanoveným pomocí elektronického dotykového snímače.

Z obr. 5 lze vidět dobrou shodu mezi výsledky získanými pomocí tenzometru na bázi koherenční zrnitosti a pomocí elektronického dotykového snímače posuvu. V ideálním případě by měly mít obě křivky jednotkovou směrnici. Ze znázorněného grafu lze vidět, že výsledky se odlišují od ideálního případu jen mírně, maximálně o 5%. Tento rozdíl může být také způsoben tím, že všechna měření jsou provedena v oblasti s maximálním rozlišením. V případě měření větších hodnot poměrného prodloužení by se tyto odchylky zmenšily. Lze si také všimnout určité hystereze po uvedení ozubených čelistí s upevněnou pryží do výchozího stavu, která souvisí s měřením v reálném čase a s předpokládanou setrvačností pryže při jejím smršťování.

Závěr

Tento příspěvek seznamuje čtenáře s možností využití korelačních vlastností polí koherenční zrnitosti k měření tenzoru malé deformace. Konkrétně byla zvolena složka pružné deformace ε_{xx} , tj. poměrné prodloužení ve směru osy x .

Výhodou prezentované metody je, že jde o bezkontaktní optické měření využívající moderní optoelektronické prvky a počítačové techniky, která značně usnadňuje řízení a vyhodnocení experimentu. Dalším důležitým faktem je, že rozlišení a nejistota měření jsou

dány konkrétní experimentální sestavou. Vhodnou volbou experimentální sestavy můžeme tedy tyto parametry měření měnit.

Podmínkou pro vznik jevu koherenční zrnitosti je nutné užití zdroje koherentního záření. I když v experimentu byl užitý He-Ne laser, není vyloučeno, například, použití laserových diod. Malé rozměry laserových diod rozšiřují možnosti praktických aplikací metody. Také je nutné si uvědomit, že CMOS (popř. CCD) detektory jsou značně citlivé na světlo a proto je nezbytné zajistit během měření nízkou hladinu světelného pozadí působícího jako šum. Tento požadavek by mohl být naopak limitujícím faktorem pro praktické aplikace metody.

Poděkování

Autoři děkují za podporu projektu Výzkumný záměr Měření a informace v optice MSM 6198959213.

Literatura

- [1] Dainty, J. C.: *Laser Speckle and Related Phenomena* – Springer-Verlag, Berlin, 1984, p. 342
- [2] Hrabovský, M., Bača, Z., Horváth, P.: *Koherenční zrnitost v optice* – UP Olomouc, Olomouc, 2001, p. 304
- [3] Yamaguchi, I., Kobayashi, K., Kuwashima, S.: *A stabilized laser speckle strain gauge* – SPIE, **1084**, pp. 45-53, 1989
- [4] Yamaguchi, I., Takemori, T., Kobayashi, K.: *Stabilized and accelerated speckle strain gauge* – Opt. Eng., **32**, pp. 618-625, 1993
- [5] Yamaguchi, I.: *Speckle Displacement and Decorrelation in the Diffraction and Image Fields for Small Object Deformation* – Optica Acta, **28**, pp. 1359-1376, 1981
- [6] Horváth, P., Hrabovský, M., Šmíd, P.: *Full theory of speckle displacement and decorrelation in the image field by wave and geometrical description and its application in mechanics* – J. Mod. Opt., **51**, pp. 725-742, 2004
- [7] Hrabovský, M., Bača, Z., Horváth, P.: *Measurement of an object rotation using the theory of speckle pattern decorrelation* – Optik, **111**, pp. 359-366, 2000
- [8] Hrabovský, M., Šmíd, P., Horváth, P., Bača, Z.: *Measurement of object vibrations using the theory of speckle pattern decorrelation* – Optik, **113**, pp. 117-120, 2002
- [9] Hrabovský, M., Bača, Z., Horváth, P.: *Theory of Speckle Displacement and its Application in Mechanics* – Opt. Lasers Eng., **32**, pp. 395-403, 2000
- [10] Hrabovský, M., Bača, Z., Horváth, P.: *Theory of Speckle Displacement and Decorrelation with Electronic Correlation* – Czech. J. Phys., **51**, pp. 129-154, 2001