

**VYUŽITIE AUTOMATIZÁCIE A METÓDY CHARAKTERISTÍK V SEPARÁCIÍ ZLOŽIEK
NAPÄTÍ.****UTILIZATION OF AUTOMATION AND THE METHOD OF CHARACTERISTICS IN
SEPARATION OF STRESSES COMPONENTS.**Oskar Ostertag, Jozef Kočan, Jozef Marcin, Ján Buša¹**Abstract:**

Method of characteristics – a method of reflection photoelasticity which enable us to analyze the stresses. By using of digital camera we can gain a whole picture of deformation fields of the analyzed surface and then by the appropriate software to analyze small deformations.

Dosiahnutie korektných výsledkov v experimentálnej mechanike tuhých a poddajných telies si vyžaduje znížiť pravdepodobnosť výskytu náhodných a systematických chýb. Ideálnou cestou je automatizácia experimentu a tiež jeho vyhodnotenia. Spojením výpočtovej techniky s produktmi založenými na báze modernej optiky objektivizujeme výsledky merania. Práve týmto postupom je možné optimalizovať tvar budúcej konštrukcie, zvýšiť jej pevnosť a tuhosť a znížiť hmotnosť.

Medzi experimentálne metódy zisťovania stavu napätosti na povrchu súčiastky, a tým aj pevnosti súčiastky, patrí metóda reflexnej fotoelasticimetrie, ktorej použitie vedie k niektorým problémom. Jedným z nich je správne určenie spektra farebných fotoelasticimetrických pruhov, a tým aj ich radu N . Farebné pruhy vznikajúce na zaťaženom povrchu reflexnej vrstvy, schopnej dočasného dvojlomu svetla, reprezentujú krivky nazývané izochromaty. Ich analógiu môžeme interpretovať vrstevnicami povrchovej mapy. Sú to krivky tvoriace geometrickú množinu bodov povrchu súčiastky, s konštantným rozdielom pomerných deformácií. Matematicky túto závislosť možno formulovať vzťahom:

$$N = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{f_\varepsilon},$$

kde ε_1 , ε_2 sú hlavné pomerné deformácie povrchu súčiastky a f_ε je pružková konštanta, závislá od stupňa citlivosti reflexnej vrstvy (spravidla je jej číselná hodnota uvádzaná výrobcom reflexne-citlivého materiálu).

Z uvedeného je možné doporučiť metódu reflexnej fotoelasticimetrie pre meranie malých deformácií povrchov konštrukcií, vyrobených jednak z izotropného, ako aj

¹ Ing. Oskar OSTERTAG, Ing. Jozef KOČAN kocan@tuke.sk - Katedra aplikovanej mechaniky SJF TU Košice,
Ing. Jozef MARCIN - Katedra kybernetiky a umelej inteligencie FEI TU Košice,
RNDr. Ján BUŠA, CSc. – Katedra matematiky FEI TU Košice.

ortotropneho materiálu. Závislosť medzi experimentálne zistenými parametrami pomernej deformácie ε_1 , ε_2 a napätiami určíme použitím všeobecného Hookovho zákona:

pre materiály izotropné:

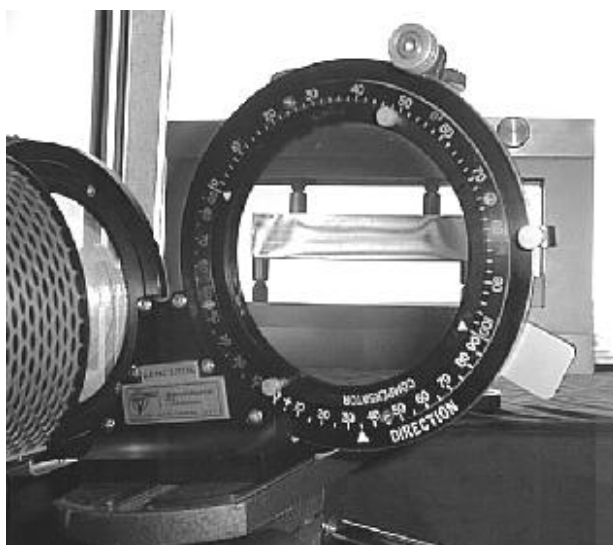
$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \mu \frac{\sigma_2}{E}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \mu \frac{\sigma_1}{E}.$$

pre materiály ortotropne:

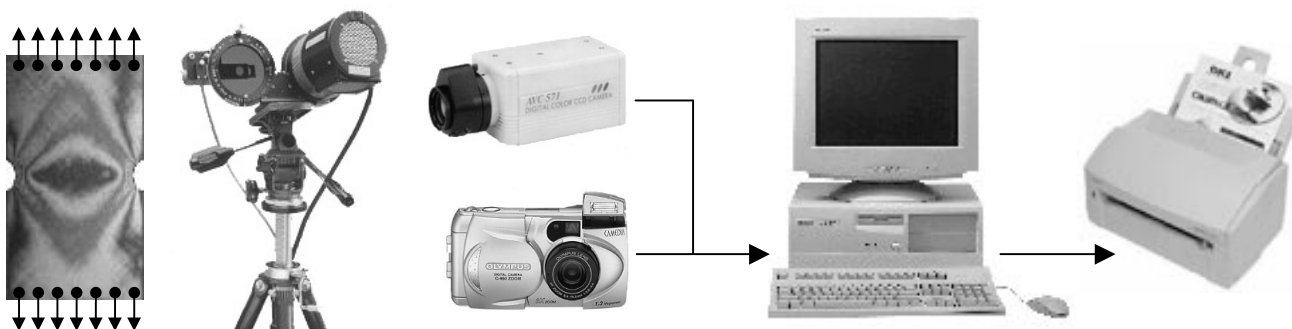
$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \mu_{12} \frac{\sigma_2}{E_2}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \mu_{12} \frac{\sigma_1}{E_1}.$$

V uvedených rovniciach E_i , E_j , μ_{ij} sú elastické konštanty.

Ak pre meranie malých deformácií konštrukcií, podrobených statickým účinkom zaťaženia, použijeme napríklad reflexný polariskop Model 030 fy VISHAY, potom farebné spektrum môžeme sledovať za analyzátorom tohto prístroja (obr. 1). Správnym stanovením farebného odtieňa izochromaty určíme jej rad N . V tejto fáze experimentu sú výsledky merania ovplyvniteľné schopnosťami experimentátora. Subjektívne odčítanie radu izochromaty môžeme vylúčiť nahradením pozorovateľa kamerou CCD alebo digitálnym fotoaparátom s vysokou rozlišovacou schopnosťou (obr. 2). Následne počítač vykoná analýzu deformačno – napäťového stavu povrchu konštrukcie.



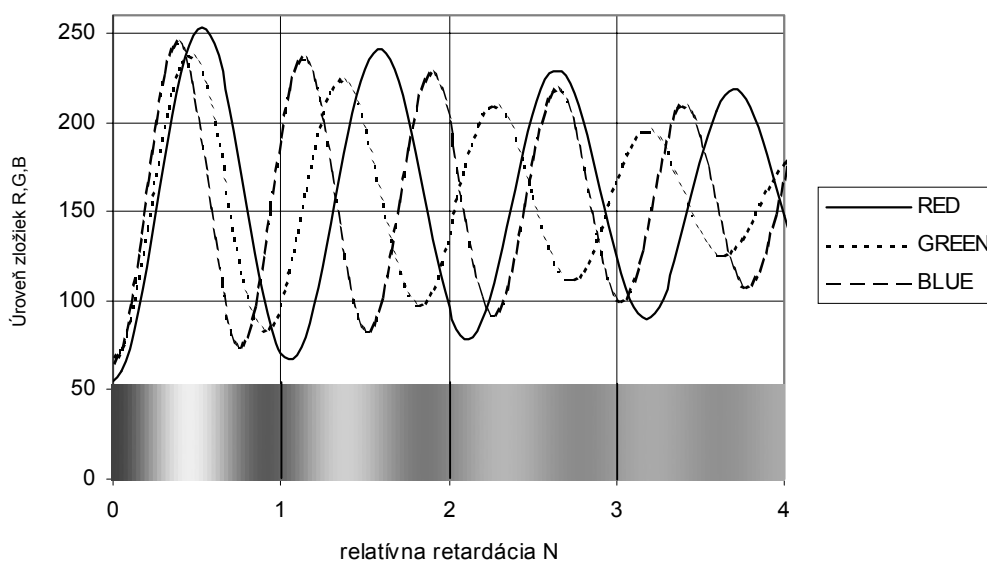
Obr. 1. Isochromaty na modeli nosníka pozorované za analyzátorom polariskopu Model 030.



Obr. 2. Merací reťazec pri RGB metóde.

Vo všeobecnosti sa metódy digitálnej fotoelasticimetrie delia podľa druhu svetla na metódy využívajúce monochromatické svetlo (svetlo s rovnakou vlnovou dĺžkou) a metódy pracujúce s bielym svetlom (spojité spektrum vlnových dĺžok). Digitálne metódy pracujúce s monochromatickým zdrojom svetla vo väčšine prípadov dosahujú uspokojivé výsledky len do hodnoty polovičného radu izochromaty. RGB metóda, využívajúca zdroj bieleho svetla, naproti tomu dosahuje dobré výsledky až do hodnoty okolo štvrtého radu izochromaty.

CCD kamera alebo digitálny fotoaparát zaznamenávajú hodnoty úrovne červenej, zelenej a modrej (RGB) zložky svetla v každom snímanom bode povrchu (pixely). Hodnoty týchto úrovní sa pohybujú v intervale 0 až 255 jednotiek. Pri každom meraní je potrebné vykonať kalibráciu týchto RGB zložiek v závislosti na hodnote pomernej retardácie svetla (poradia izochromaty). Táto kalibrácia je potrebná, pretože opticky citlivé vrstvy majú rôznu priepustnosť pre rôzne vlnové dĺžky svetla. Taktiež každý zdroj svetla vyžaruje charakteristické svetelné spektrum. A v neposlednom rade aj rôzne CCD kamery nezaznamenávajú RGB úrovne rovnako. Typický priebeh RGB úrovní a tomu odpovedajúci farebný odtieň v závislosti od relatívnej retardácie je na obr. 3. Vzdialenosť lokálnych extrémov jednotlivých kriviek závisí od vlnovej dĺžky jednotlivých zložiek RGB použitého svetla. Útlm kriviek závisí od optických vlastností použitého materiálu opticky citlivej vrstvy, od dráhy svetelného lúča (od hrúbky vrstvy), ako aj od optických vlastností polariskopu.



Obr. 3. Typický priebeh RGB úrovní v závislosti od relatívnej retardácie N a tomu odpovedajúci farebný odtieň.

V tabuľke č.1 sú uvedené úrovne RGB zložiek v závislosti od veľkosti retardácie, ako aj tomu odpovedajúci farebný odtieň svetla. Merací reťazec je na obr. 2. Izochromatické obrazce sa cez polariskop zaznamenávajú CCD kamerou alebo digitálnym fotoaparátom. Tento obraz je prevedený do počítača a následne analyzovaný špeciálnym softvérom, ktorý bol vytvorený na uvedených katedrách Technickej univerzity. Softvér porovnáva úrovne RGB zložiek v meraných bodoch s kalibračnou tabuľkou. Kalibračná tabuľka sa musí vytvárať pre každý druh vrstvy osobitne. Výstupom softvéru je hodnota retardácie a tým aj rozdielu hlavných pomerných deformácií v každom meranom bode povrchu.

Tab. č. 1

Pozorovaná farba	Retardácia Δ [nm]	Relatívna retardácia	R	G	B
čierna	0	0	55	68	65
sivá	50	0,09	70	86	90
biela	200	0,34	199	215	240
žltá	400	0,68	216	158	89
oranžová	450	0,76	176	118	74
červená	500	0,85	127	88	98
Prechodová farba 1	590	1,00	71	98	192
modrá	650	1,10	69	139	233
zelená	700	1,19	93	181	227
žltá	800	1,36	175	224	134
oranžová	900	1,53	237	184	83
červená	1000	1,70	223	115	156
Prechodová farba 2	1180	2,00	96	138	199
zelená	1300	2,20	88	204	101
žltá	1400	2,37	150	197	114
ružovo-červená	1550	2,63	229	120	218
Prechodová farba 3	1770	3,00	124	169	101
bledo zelená	1800	3,05	108	181	101
ružová	2100	3,56	196	129	170
Prechodová farba 4	2360	4,00	148	177	168

Vývoj a využitie moderných experimentálnych metód pre skúmanie chovania sa mechanických systémov z konvenčných a novodobých materiálov s cieľom ich lepšieho využitia si vyžiadal matematicky sformulovať a overiť možnosti realizácie týchto metód aj pre ortotropne materiály.

Pri určovaní zložiek deformácie, resp. napätosti vo vnútorných bodoch oblasti kompozitného materiálu pokrytého opticky citlivou vrstvou nás úloha vedie k riešeniu sústavy parciálnych kvazilineárnych diferenciálnych rovníc hyperbolického typu. Riešenie je najvýhodnejšie vykonať tzv. metódou charakteristík, ako okrajovej úlohy Cauchyho, resp. Riemannovej [4] v tvare

$$\frac{\partial S_{\epsilon}}{\partial \xi} k_1^{\epsilon} + \frac{\partial R_{\epsilon}}{\partial \xi} c_{\epsilon} k_2^{\epsilon} + \frac{\partial R_{\epsilon}}{\partial \eta} s_{\epsilon} 4D_{66} = 2R_{\epsilon} (k_2^{\epsilon} s_{\epsilon} \varphi_{\xi}^{\epsilon} - 2D_{66} c_{\epsilon} \varphi_{\eta}^{\epsilon}),$$

$$\frac{\partial S_{\epsilon}}{\partial \eta} k_2^{\epsilon} + \frac{\partial R_{\epsilon}}{\partial \xi} s_{\epsilon} 2D_{66} + \frac{\partial R_{\epsilon}}{\partial \eta} c_{\epsilon} k_3^{\epsilon} = 2R_{\epsilon} (k_3^{\epsilon} s_{\epsilon} \varphi_{\eta}^{\epsilon} - 2D_{66} c_{\epsilon} \varphi_{\xi}^{\epsilon}),$$

kde $c_{\epsilon} = \cos 2\varphi_1^{\epsilon}$, $s_{\epsilon} = \sin 2\varphi_1^{\epsilon}$ a φ_1^{ϵ} je uhol udávajúci smer hlavných pomerných deformácií v kartézskom súradnom systéme x, y ,

$\varphi_{\xi}^{\varepsilon} = \frac{\partial \varphi_1^{\varepsilon}}{\partial \xi}$ a $\varphi_{\eta}^{\varepsilon} = \frac{\partial \varphi_1^{\varepsilon}}{\partial \eta}$ sú uhly udávajúce polohy osí ortotropie v kartézskom súradnom systéme x, y ,

$$S_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \text{ a } R_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2}, \text{ pričom } \varepsilon_1 \text{ a } \varepsilon_2 \text{ sú hlavné pomerné deformácie,}$$

k a D sú elastické konštanty.

Tradičné oblasti použitia fotoelasticimetrie boli vo väčšine prípadov nahradené modernejším numerickými metódami, ako sú metóda konečných prvkov (MKP) alebo metóda hraničných prvkov (MHP). Tieto metódy sú pohodlnejšie, rýchlejšie a hlavne dostupnejšie širšiemu okruhu používateľov. Počítače, ktoré túto skutočnosť umožnili, presunuli použitie fotoelasticimetrie do nových a dosiaľ neprebádaných oblastí. Rozvoj v laserovej technike, optických vláknach, v digitálnych postupoch pre rozpoznávanie tvarov, nové postupy v zbere a spracovávaní údajov rozširujú okruhy problémov, pre ktoré sa stáva fotoelasticimetria veľmi vhodnou metódou.

- [1] BURGER, Ch. P.: Photoelasticity, KOBAYASHII, A. S.: Handbook on Experimental Mechanics SEM. Bethel, 1993.
- [2] TREBUŇA, F. – BIGOŠ, P.: Intenzifikácia technickej spôsobilosti ťažkých nosných konštrukcií. Vienaľa, Košice, 1998.
- [3] TREBUŇA, F. – ŠIMČÁK, F.: Určenie napätosti po nezaťaženom obryse súčiastky z kompozitného materiálu metódou Photostress. In: Zborník vedeckých prác VŠT v Košiach 1990, Alfa Bratislava 1991 str. 489 – 496.
- [4] TREBUŇA, F.: Určovanie zložiek napätosti metódou reflexnej fotoelasticimetrie s priamym prepojením fotoelasticimetra s minipočítačom. In: Strojirenství č. 1. ročník 39, SNTL Praha 1989, str. 279 – 286.