

APLIKACE METODY REFLEXNÍ FOTOELASTICIMETRIE NA VLÁKNOVÉ KOMPOZITY

Ing. Milan RŮŽIČKA, CSc. Strojní fakulta ČVUT Praha
katedra nauky o pružnosti a pevnosti

Resumé: Příspěvek se zabývá sledováním vrubových účinků v dlouhovláknových kompozitech o komponentech uhlíkové vlákno epoxidová matrice. Metodou reflexní povrchové fotoelasticimetrie je analyzována napjatost plochého vzorku s kruhovým otvorem. Výsledky jsou porovnány s tenzometrickým měřením a s analytickým řešením pro nekonečnou ortotropní desku s otvorem dle lit /1/.

1. Úvod

Laminátem nazvěme kompozitní desku (tl. cca 1-2 mm), která vznikne vrstvením a vytvrzením tzv. "pregregu", tvořeného jednosměrně uspořádanými vlákny v epoxidové matici (tl. $t_k = 0,125$ mm), viz obr.1. Jedná se o ortotropní materiál, u něhož můžeme pořadím vrstev a natočením souř. systému os (1,2) v (x,y) řídit míru ortotropie. Pracovali jsme se symetrickými lamináty, kdy úhly vrstvení θ jsou symetrické vůči střední rovině. Skladbu takového laminátu s 8 vrstvami označíme $(\theta_1/\theta_2/\theta_3/\theta_4)_S$.

Složky deformace a středního napětí u tenké tahově zatěžované laminátové desky tloušťky t (dle obr.1) lze určit pomocí klasické laminační teorie, viz lit /2/. Platí

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{t} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ \text{sym} & A_{22} & A_{23} \\ & & A_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \text{ resp. } \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = t \begin{bmatrix} A'_{11} & A'_{12} & A'_{13} \\ & A'_{22} & A'_{23} \\ & & A'_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

kde A_{ij} , A'_{ij} jsou prvky matice tuhosti resp. poddajnosti spočtené dle /2/. K optimalizaci tuhosti laminátů, k určování deformací a napětí vrstev jsme sestavili programy MAT, MATEPS, MASIG pro osobní počítače PC.

2. Metoda reflexní fotoelasticimetrie

Možnosti sledování vrubových účinků na vláknových kompozitech metodou reflexní povrchové fotoelasticimetrie jsme testovali na případu plochého vzorku s kruhovým otvorem. Pro

limitní případ nekonečné desky tahově zatížené zde známe analytické řešení pro napětí na povrchu otvoru, viz lit /1/.

2.1 Zkušební vzorky

Tvar a rozměry vzorku s otvorem ukazuje obr.2. Byly vyrobeny z prepregu "FIBREDUX C 920-TS 300" tl. 0,125 mm s těmito materiálovými konstantami: $E_1=128,6$; $E_2=9,63$;
 $G_{1,2}=5,6$ /GPa/, $\nu_{12}=0,262$

Vzorky byly laminovány symetricky z 8 vrstev a vytvrzeny v autoklávu (při 125°C a tlaku 1bar) na tl. $t=1$ mm. Typy symetrických vrstvení lamin a programem "MAT" spočtené konstanty ty ukazuje tab 1. Pracovní část vzorků jsme po jedné straně polepili opticky citlivou vrstvou s dolním reflexním povrchem. Použili jsme vrstvu PS-1 tl. 1mm (Vishay Micro Measurement) s materiálovými konstantami $E_v=2,5$ GPa, $\nu_v=0,38$. Optická citlivost vrstvy byla $f=1760$ $\mu\text{m}/\text{řád}$. Vzorky jsme zatěžovali prostým tahem v zatěžovacím rámu.

2.2 Postup měření a jeho vyhodnocení

Pomocí reflexního fotoelasticimetru Vishay model 031 jsme sledovali a zdokumentovali obrazy izochromat a izoklin v okolí otvoru. Tardého kompenzační metodou jsme dále podrobně zjišťovali řád izochromat N (θ) podél okraje otvoru. Jak ukazuje obr.6 nemusí být nejvyšší řád izochromaty vždy v příčném řezu otvorem, jako je tomu u izotropních materiálů.

Reflexní povrchovou fotoelasticimetrií získáme difference hlavních deformací $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = N \cdot f$. (2)

Separovat deformace $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ můžeme pouze při použití dalších exp. postupů, např. při měření s větším úhlem průchodu světla vrstvou, viz lit /3/. To jsme však neprováděli.

Pro obecný bod povrchu otvoru v ortotropní desce bude směr hlavních deformací θ_ε odlišný od směru θ_σ , který určuje směr hl. napětí σ_t v otvoru (zde $\sigma_r = \tau_{rt} = 0$) viz obr.3. Při jednoosé napjatosti pak dle /4/ platí

$$\tan 2\theta_\varepsilon = \frac{A'_{66} \cdot \tan 2\theta_\sigma}{(A'_{11} - A'_{22}) - (A'_{12} - A'_{21}) \tan 2\theta_\sigma} \quad (3)$$

kde A_{ij}, A'_{ij} jsou prvky matice tuhosti a matice poddajnosti laminátu, v souřadnicích (x, y) spočtené dle kap.1. Hlavní deformace ε_ξ a ε_η lze pro známé úhly θ_σ a θ_ε vyjádřit jako

funkci napětí $\sigma_x \equiv \sigma_t$ podle rovnice (1) (na povrchu otvoru $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_\xi \\ \varepsilon_\eta \\ 0 \end{Bmatrix} = [T_\xi]^{-1} \cdot [T_\xi] \cdot \begin{Bmatrix} A'_{11} \\ A'_{12} \\ A'_{13} \end{Bmatrix} \cdot t \cdot \sigma_t = \begin{Bmatrix} \bar{A} \\ \bar{B} \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot t \cdot \sigma_t \quad (4)$$

kde $[T]$, $[T]^{-1}$ jsou transformační matice goniometrických funkcí mezi souř. systémy $(x, y) \rightarrow (1, 2)$ a $(\xi, \eta) \rightarrow (1, 2)$ pro úhly θ_σ , θ_ε .

Rovnici (2) lze pak vyjádřit pomocí (4) jako $\varepsilon_\xi - \varepsilon_\eta = N \cdot f = (\bar{A} - \bar{B}) \cdot t \cdot \sigma_t$ odkud hledané střední tečné napětí

$$\sigma_t = \frac{N \cdot f}{\bar{A} [1 + \nu_{\xi\eta}]} \quad , \quad (\nu_{\xi\eta} = -\frac{\bar{B}}{\bar{A}}) \quad (5)$$

2.3 Korekce systematických chyb

Aby výsledky nebyly zatíženy systematickými chybami, je třeba provést jejich kompenzaci. Mezi nejvýznamnější vlivy patří

- přídavný dvajlom v opticky citlivé vrstvě
- vliv vyztužení laminátu v důsledku nalepené vrstvy
- vliv ohybu při jednostranném nalepení vrstvy na vzorek
- vliv rozdílných hodnot Poissonových konstant laminátu a vrstvy
- vliv změn teploty prostředí a teploty vzorku

První z vlivů jsme eliminovali vhodnou technologií dělení a vrtání opticky citlivé vrstvy, aby nedošlo k vyhrátí okrajů. Osvědčilo se provádět tyto operace za intenzivního chlazení a před nalepením vrstvy na laminát, takže nevzniknou vzájemná pnutí ani možné delaminace lepení při povrchu otvoru.

Vliv vyztužení vzorku ve směru x a vliv přídavného ohybu jsme modelovali pomocí laminační teorie výpočtovým programem "MASIG". Jestliže totiž zahrneme opticky citlivou vrstvu do laminační teorie, obdržíme z porovnání deformací střední roviny kompozitu a vrstvy korekční faktor $C_1 = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_k}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_v}$, který koriguje vliv ohybových napětí. Porovnáním tuhostí ve směru x s výpočtem tuhosti kompozitu bez opticky citlivé vrstvy spočteme korekční faktor $C_1 = \frac{(A_{11})_{k+V}}{(A_{11})_v}$.

Velikost faktorů se pohybuje $C_1=1,03$ až $1,07$ a $C_2=1,08$ až $1,34$ (kompozit typu B). Shodu modelového rozložení deformace jsme ověřovali tenzometricky, jak ukazuje obr.4.

Ke snížení vlivů změn teploty okolí a zahřívání vzorku od světelné energie jsme chladili vzorek tlakovým vzduchem.

Korekci na rozdílná Poissonova čísla laminátu $\nu_{\xi\eta}$ a ν vrstvy se zabývá např. lit /3/. Tento jev je významný zejména na volném okraji. Pro velikost řádu izochromat ve vzdálenosti y od okraje lze psát

$$N(y) = [1 + \nu_{\xi\eta} + C_3(y) \cdot (\nu_v - \nu_{\xi\eta})] \cdot \frac{\varepsilon_t}{f} \quad (6)$$

Na volném okraji platí $C_3(0) = 1$

Pomocí rovnic (5), (6) a faktorů C_1 , C_2 určíme korigované střední tečné napětí na okraji otvoru pro změřený dvojlom $N_{\text{měř}}(\phi)$

$$\sigma_t = \frac{N_{\text{měř}}(\phi) \cdot C_1(\phi) \cdot C_2(\phi) \cdot f}{A(\phi) [1 + \nu_v]} \quad (7)$$

K výpočtu korekci a napětí byl sestaven program "FOMA". Lze jím dále určit též napětí v jednotlivých laminách $(\sigma_t)_k$ a kontrolovat vznik porušení laminy, např. dle kritéria Tsai-Hillova /1/.

2.4 Výsledky měření

Příklad průběhu tečné deformace $\varepsilon_t(\phi)$ na povrchu otvoru v laminátu $(\pm 45/0/90)_s$ ukazuje obr.5. Zároveň zde jsou vyneseny výsledky tenzometrických měření získané miniaturními tenzometry TML-02-11 (Japonsko) s měřicí základnou 0,2mm, které byly nalepeny do otvoru. Shoda výsledků je uspokojivá.

Ukázka průběhu řádu izochromat, deformace a napětí v tečném směru je pro laminát $(0/90/0/90)_s$ na obr. 6. Vidíme, že v důsledku ortotropie nevzniká extrém deformace a napětí laminátu ve stejném místě. Shoda průběhu středního tečného napětí s teoretickými průběhem v nekonečné desce je dobrá.

Převzeme-li konvenční definici součinitele koncentrace napětí jako

$$\alpha = \frac{\sigma_t(\phi=0^\circ)}{\sigma_{\text{nom}}} \quad \text{při} \quad \sigma_{\text{nom}} = \frac{F}{B \cdot t} \quad (8)$$

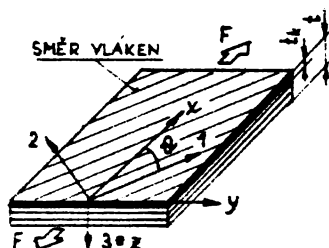
lze znázornit podle obr.7 jeho průběh v závislosti na šířce vzorku B. Pro laminát (0/90/0/90) je tento průběh vynesena ve srovnání s izotropním materiálem. Shoda fotoelasticimetrických výsledků byla opět srovnávána s tenzometrickým měřením a je uspokojivá.

3. Závěr

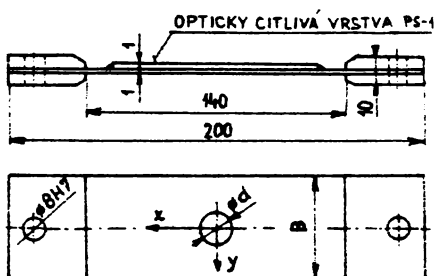
Reflexní povrchová fotoelasticimetrie je vhodnou a dobře použitelnou experimentální metodou k vyšetření koncentrací deformací a napětí na tenkostěnných laminátech. Její aplikace však vyžaduje použití teoretického modelu výpočtu prvků matice tuhosti a poddajnosti kompozitu. Uspokojivě vyhovuje použití klasické laminační teorie. Po korekci systematických chyb měření lze získat kvantitativní výsledky deformací a středních napětí na volném okraji, které jsou v dobré shodě s výsledky určenými tenzometricky. Metoda tak může pomoci řešit řadu konstrukčních otázek, zejména koncentrací napětí v tvarových změnách tenkých laminátových skořepin.

Literatura:

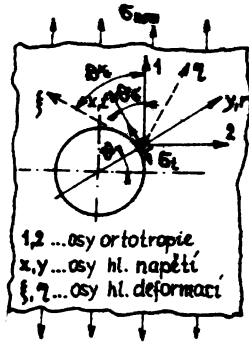
- /1/ SAVIN G.N.: Stress Concentration Around Holes
Pergamon Press, 1961
- /2/ AGARWAL B.D.: Vláknové kompozity, Překlad z angl.,
BROUTMAN L.J. SNTL, Praha 1987
- /3/ ZANDMAN F.: Photoelastic Coatings. SESA Mon.No 3
REDNER S. Science Press, Ephrato 1977
DALLY W.J.
- /4/ GRESZUK L.B.: Orientation Effects in the Mechanical
Behavior of Anisotropic Struct. Materials
Amer.Soc.Testing Mat., Publ.405, 1966



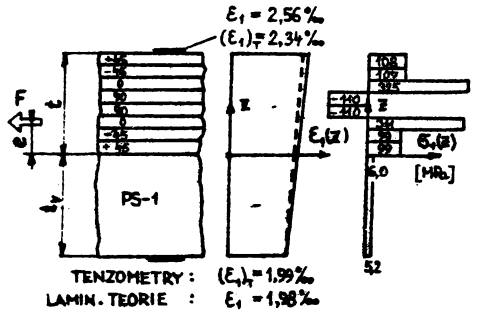
Obr.1 Vrstvený laminát a orientace souř. systému



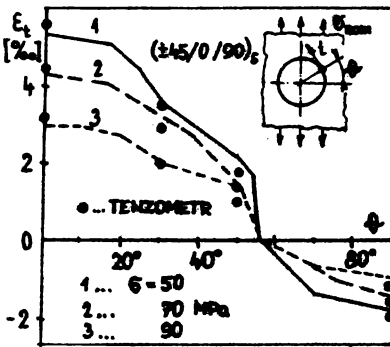
Obr.2 Zkušební vrubované vzorky (B/d = 4,2)



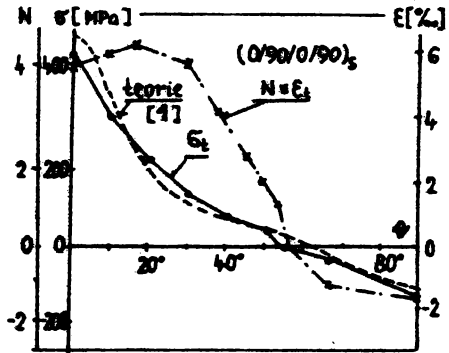
Obr.3 Směry hlavních napětí a deformací



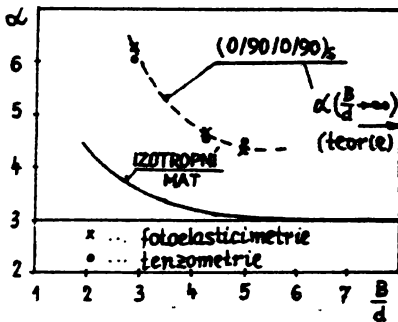
Obr.4 Deformace a napětí v laminátu s optikou citlivou vrstvou



Obr.5 Porovnání výsledků fotoelast. a tenzometrie



Obr.6 Porovnání experimentálních napětí s analytickým postupem



Obr.7 Změna koncentrace napětí s relat. šířkou vzorku

Výpočet dle [3]		Tenzom.			
Ozn.	Vrstvení	E_x	E_y	G_{xy}	ν_{xy}
A	$(0)_s$	128,6	9,6	5,6	0,26
B	$(0/90/0/90)_s$	69,5	69,5	5,6	0,037
E	$(\pm 45/0/90)_s$	50,7	50,7	19,5	0,30
		[6Pa]	[6Pa]	[6Pa]	[1]

Tab.1 Porovnání výpočtu tuhosti laminátu s tenzometrií