EAN '94

32th Conference of Experimental Stress Analysis
32. konference o experimentální analýze napětí
30. 5. - 2. 6. 1994 VŠST Liberec Czech Republic

RAIL-SHEAR TEST OF ELASTIC-PLASTIC COMPOSITE WEAKENED BY A HOLE

SMYKOVÁ KOLEJNICOVÁ ZKOUŠKA PRUŽNĚ-PLASTICKÉHO KOMPOZITU OSLABENÉHO OTVOREM

Valach, J., Minster, J., Vavřík, D.

The paper deals with a comparison of the numerical modelling and experimental analysis of an in-plane shear deformation response of a filled polymer composite plate weakened by a hole. Mechanical behaviour of the tested material is simulated by elastic-plastic model with stiffening. The 3-rail shear test is used for experiments. Plastic damage regions experimentally detected by penetrant flaw are compared with numerical results based on FEM.

1. ÚVOD

Kolejnicová zkouška je jednou z řady experimentálních metod umožňujících vyšetřování desek smykově zatížených ve své rovině. Zdvojená podoba této zkoušky označovaná jako "3-rail shear test" (ASTM D4255) je v komplexním hodnocení (viz [1]), zahrnujícím ocenění nákladů na přípravu zkoušky a její provedení ve vztahu ke kvalitě dosažených výsledků, hodnocena jako nadprůměrná. Výhody spojené s užitím jednoduchého zkušebního zařízení, se snadnou přípravou vzorků a prostým způsobem vnějšího zatížení vedly autory této práce k volbě zdvojené kolejnicové zkoušky k realizaci smykového zatížení v zorném poli SEM (viz [2]). Součástí přípravy pro tento záměr s cílem získat teoretické i praktické zkušenosti s prováděním kolejnicové zkoušky v makroměřítku je tato práce.

2. ZDVOJENÁ KOLEJNICOVÁ ZKOUŠKA

Plochý vzorek ve tvaru desky je upnut mezi tři páry tuhých přiložek. Vnější páry jsou fixovány a vnitřní pár se v rovině vzorku vertikálně posunuje působením tlakových nebo tahových sil. Paralelním vzájemným posunem vznikají dvě smyková pole, která, s ohledem na materiálovou symetrii, mohou působit na pracovní části zkoušeného vzorku současně jako kladný a záporný smyk.

V případě symetrického ortotropního laminátu má základní rovnice tvar

$$\begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Q_{11}+Q_{22}}{2} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & \frac{Q_{11}+Q_{22}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \qquad (1)$$

a pro kolejnicovou zkoušku platí $N_1=N_2=0$; $N_{12}/h = P/2ah = \sigma_{12}$, když P je vnější síla, h tloušťka a a výška

pracovní části vzorku. Realizace zkoušky odpovídá v převážné části pracovního pole vzorku homogenní deformaci definované posunutím $u=0$, $v=x\cdot(c/b)$, kde c je vzájemné posunutí tuhých příložek a b šířka pracovního pole vzorku. Napětí je dáno vztahy:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= N_1/h = Q_{12}\cdot(c/b)^2 \\ \sigma_{22} &= N_2/h = \tfrac{1}{4}\cdot(Q_{11}+Q_{22})\cdot(c/b)^2 \\ \sigma_{12} &= N_1/h = Q_{66}\cdot(c/b). \end{aligned} \tag{2}$$

Distribuce napětí nebo přetvoření desek oslabených otvorem je dána superposicí homogenního pole od vnějšího zatížení a poruchového pole způsobeného koncentrátorem. Konečnost rozměrů desky komplikuje analytické řešení.

3. EXPERIMENTY

Experimentální program byl realizován na vzorcích vyrobených z plněného termoplastického kompozitu Taboren PC 48K40-936. Tento materiál je představitelem jedné krajní třídy kompozitů s nelineárním pružně-plastickým (přesněji pružně-vazkoplastickým) chováním a nízkými hodnotami tuhosti. Byl použit jako modelový materiál i v předchozích pracech autorů [3].

Odzkoušeny byly celkem čtyři serie vzorků, z nichž tři byly oslabeny otvory v centrální části pracovního pole. Otvory byly kruhové a oválné s poměrem hlavních rozměrů 1/2 a 1/3, orientované delší poloosou ve směru působícího vnějšího zatížení. Charakteristický průběh záznamu zatížení-posun odpovídal tahovému diagramu (viz **obr. 1**). Průměrná nominální hodnota maximálního smykového napětí na oslabeném průřezu σ^*_{12} činila při rychlosti vnějšího zatížení posunem *0.5* mm/min $\sigma^*_{12}=23.9 \pm 0.8$ *[MPa] (3.3 %)* (srovnej se smykovým pracovním diagramem na **obr. 1**). Přitom rychlost plastické deformace do jistého okamžiku zkoušky zaostávala za přírůstkem deformace od vnějšího zatížení. Po dosažení maximálního odporu počala vnější síla v důsledku zrychlení rozvoje plastické deformace klesat. Oblasti největšího poškození vzorků v oblastech plastické deformace byly po ukončení zkoušek zviditelněny (viz **obr. 4c, d**) podle normy DIN 54 152 BAB-BCB penetrantem MR-System.

4. ŘEŠENÍ MKP

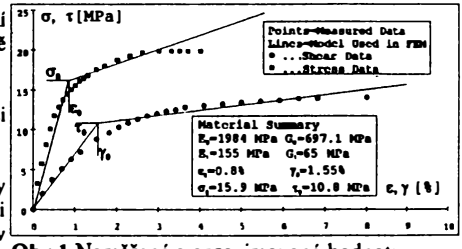
Výpočet byl proveden pomocí systému ANSYS v. 5.0 s uvažováním pružně-plastického chování materiálu. Zatěžování (úloha byla řešena v posunutích) bylo rozděleno na 12 stupňů s cílem snížit počet iterací v jednotlivých stupních nezbytných k sestavení matice tuhosti pro tuto úlohu. Podmínka konvergence řešení byla založena na dosažení silové rovnováhy v uzlech s přesností 0.001 maxima síly.

I když Taboren lze považovat za kvasi-isotropní materiál, potřeba respektování nelineárního chování si vynutila užití modelu anisotropního pružně-plastického materiálu se zpevněním, který bere ohled na nezávislé průběhy E a G, byť s omezením, že budou aproximovány bilineární čarou.

Z experimentálních dat byly odvozeny bilineární průběhy materiálových parametrů na základě následujících podmínek (viz **obr. 1**):

1. přímková část vychází z počátku a má směrnici rovnou počáteční měřené hodnotě,

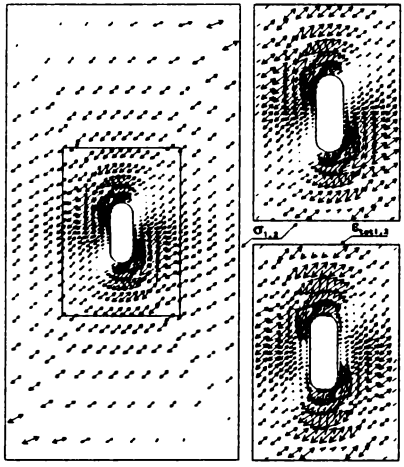
2. bod zlomu a směrnice druhé části jsou voleny tak, aby součet čtverců odchylek mezi naměřenými hodnotami a hledanou funkcí byl minimální v celém rozsahu měření.

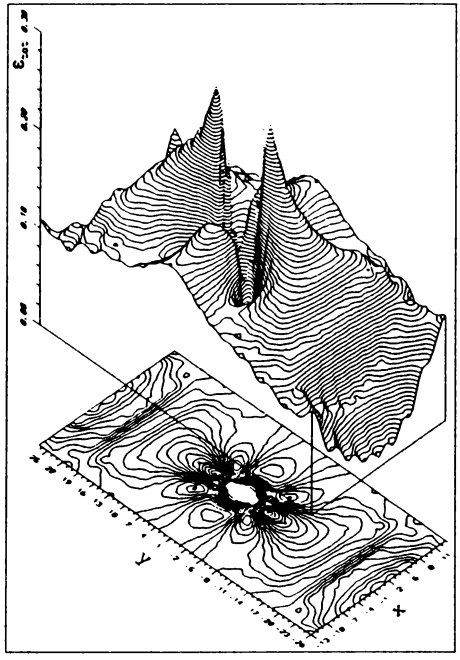


Obr.1 Naměřené a aproximované hodnoty materiálových parametrů.

Obrázek 2 porovnává hlavní napětí a hlavní celkové deformace v uzlových bodech. Z obrázku je patrné, že směry hlavních hodnot obou veličin jsou kolineární. Dále se ukazuje převládající jednoosé silové zatížení v okolí koncentrátoru na rozdíl od distribuce přetvoření.

Obrázek 3 ukazuje vypočtené rozložení celkové smykové deformace v tělese; demonstruje dramatické změny deformace v okolí otvoru.





Obr. 2. Srovnání hlavních napětí a hlavních smykových deformací v okolí otvoru.

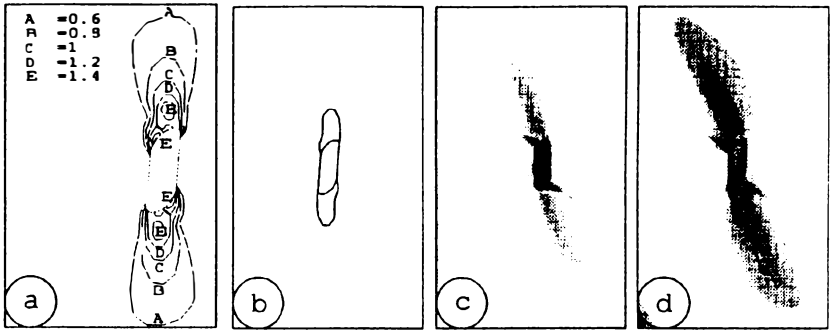
Obr. 3 ➤ Průběh celkové pružně-plastické smykové deformace v tělese.

5. KRITERIUM PORUŠENÍ

Kriterium porušení bylo zvoleno v nejobecnější formě Hillovy podmínky plasticity, která má v prostoru deformací tvar [4]:

$$\left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_k}\right)^2 - \frac{\varepsilon_x \cdot \varepsilon_y}{\varepsilon_k^2} + \left(\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_k}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \varepsilon_{xy}}{\gamma_k}\right)^2 = 1 \qquad (3)$$

Hodnoty ε_k a γ_k představují kritické hodnoty tahové a smykové deformace. Hodnoty složek lokální deformace v místech poškození nebyly v průběhu experimentu měřeny. Proto bylo nutné použít ke vzájemnému srovnání numerického výpočtu s experimentálně stanovenými oblastmi poškození parametrizace vstupů kritických hodnot ε_k, γ_k.



Obr. 4 Srovnání modelových a experimentálních oblastí plastického přetvoření.

Legenda **obr. 4a** uvádí hodnoty podmínky porušení (3), které přísluší vykresleným isolíniím této podmínky v okolí otvoru. Na obrázku jsou zřetelné dvě oddělené oblasti maximálního poškození (ohraničené isoliniemi E), odpovídající experimentálním výsledkům zobrazeným na **obr. 4c** a **d**. **Obr. 4c** představuje případ, který byl studován numericky a **obr. 4d** ukazuje vzorek zatížený daleko za hranici maximálního vnějšího zatížení se značným rozvojem plastické deformace.

6. ZÁVĚR

Experimentálními výsledky i numerickým modelováním byly pro daný typ materiálu shodně určeny oblasti maximálního přetvárného poškození.

LITERATURA

[1] LEE, S., MUNRO, M.: In-plane Shear Properties of Graphite Fibre/Epoxy Composites for Aerospace Applications; Evaluation of Test Methods by Decision Analysis Technique. Aeronautical Note NAE-AN-22, NRC No. 23778, Ottawa, 1984

[2] VAVŘÍK, D.: Přídavné univerzální zařízení k hydraulickému deformačnímu adaptéru k rastrovacímu elektronovému mikroskopu, *na jiném místě tohoto sborníku*

[3] VALACH, J., MINSTER, J.: Nelineární elastické chování desky s otvorem zatížené čistým smykovým zatížením. Sborník 31. konf. EAN, Měřín, 299, 1993

[4] TSAI, S. W.: A Survey of Macroscopic Failure Criteria for Composite Materials, J. Reinforced Plastics and Comp., 3, 40, 1984

Práce představuje výsledky řešení dílčí části projektu podporovaného grantem GA AV ČR 27 107.

Kontakt na autory:
ÚTAM AV ČR, Pod vodárenskou věží 4, 182 00 Praha 8
Tel.: (02) 66 05 31 07-8, Fax: (02) 798 72 61
E-mail: mcmitam@earn.cvut.cz