

**DEFORMAČNÍ ANALÝZA ROZHRAŇÍ DVOU MATERIÁLŮ
POMOCÍ MOIROVÉ INTERFEROMETRIE****DEFORMATION ANALYSIS OF BIMATERIAL INTERFACES
USING MOIRE-INTERFEROMETRY**Jiří Minster, Zdeněk Fiala¹, Pavel Václavík²**Abstract:**

The paper presents some results of experimental verification of analytical-numerical determination of interface fracture toughness using a bimaterial Brazil test model. Evaluation and interpretation of interferograms, continuously recorded from the beginning to the fracture of specimens, approved the used model assessment of non-stability caused by initiation and propagation of interface crack from the edge of the interface. The anticipated possibility was supported that the interface fracture toughness for both central and edge cracks on the interface can be defined according to the Rice approach.

Key words: deformation analysis, moire- interferometrie, bimaterial interface

1. ÚVOD

Rozhraní dvou materiálů s výrazně odlišnými mechanickými vlastnostmi a jeho okolí vždy představuje oblast vyžadující zvláštní pozornost. Slabými místy takového rozhraní jsou zejména blízká okolí koncentrátorů napětí jako jsou kraje rozhraní a čela trhlin, které se na rozhraní vyskytují. Živé a dosud neuzavřené problematice šíření trhliny na bimateriálovém rozhraní a metodami stanovení lomové houževnatosti rozhraní byla věnována v nedávné době řada experimentálních a analytických prací i v České republice (viz [1], [2], [3] a [4]).

Experimentální stanovení lomové houževnatosti rozhraní vyžaduje vhodný typ zkušebního vzorku, který by umožnil dosažení co nejširšího rozsahu fázového úhlu ψ reprezentujícího stupeň smísení tahového a smykového modu šíření trhliny. Možným vhodným typem je tzv. Brazílský disk (viz. Obr. 1) zatížený na dvou protilehlých povrchových přímkách dvojicí tlakových sil. Tlakovým zatížením lze vyvolat před čely centrální trhliny smíšený zatěžovací mód, přičemž poměr základních módů lze snadno měnit vzájemným natáčením rovin zatížení a rozhraní. Přirozeně, koncentrátorem napětí u tohoto vzorku je vedle centrální trhliny i okraj rozhraní obou materiálů. Ten je ovšem u dané kombinace charakterizován singularitou typu $\sigma_{ij} \approx r^{-0.7368}$ a uvedený koeficient úměrnosti nelze bezprostředně svázat s rychlostí uvolňování deformační energie podobně jako faktor

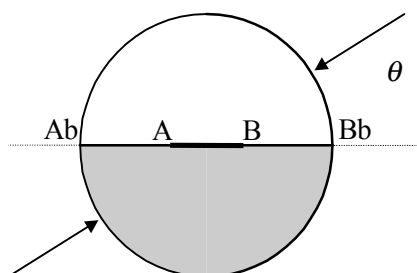
¹ Ing Jiří Minster, CSc., RNDr. Zdeněk Fiala, CSc. ÚTAM AV ČR, Prosecká 76, 190 00 Praha 9
tel. 2-697 8512, 2-8688 2121/207, Fax 2-88 4634, E-mail: minster@itam.cas.cz, fiala@itam.cas.cz

² Ing. Pavel Václavík, Ústav přístrojové a řídicí techniky, Odbor přesné mechaniky a optiky, Horská 3, 120 00 Praha 2, tel. 2-249 155 67/227

intensity napětí u trhliny se singularitou typu $r^{-0.5}$. Proto byl (viz [4]) pro stanovení hnací síly trhliny použit předpoklad existence infinitesimální trhliny na okraji rozhraní a hnací síla trhliny byla stanovena podle vztahu

$$G(\psi_0) = \lim_{\ell \rightarrow 0} \frac{\partial(U-W)}{\partial \ell} \quad ; \quad \psi_0 = \lim_{\ell \rightarrow 0} \psi(\ell) \quad (1)$$

ve kterém $(U-W)$ představuje rozdíl mezi energií pružné deformace a prací vnějších sil. Výsledky numerického řešení založeného na uvedeném předpokladu jsou ve zjednodušené podobě pro kombinaci epoxidová pryskyřice (E) – sklo (G) uvedeny v tabulce 1 (podrobněji viz [4]).



Obr. 1

Tab. 1 Kritické síly P_{crit} iniciace a šíření trhliny v bimateriálovém rozhraní epoxid-sklo

vzorek	EG (s centrální trhlinou)			
θ	6.89 ⁰		11.25 ⁰	
místo	A	Bb	A	Bb
P_{crit} [N/mm]	120.4	72.5	123.5	117.0
vzorek	EG (bez trhliny)			
θ	6.89 ⁰			
místo	Ab	Bb	Ab	Bb
P_{crit} [N/mm]	395.3	77.0		

Je zřejmé, že složený vzorek materiálově a geometricky úměrný uvedenému typu se bude porušovat z okraje rozhraní Bb, kde vnější zatížení působí na materiál s nižší tuhostí. Výjimku tvoří vzorky s úhlem odklonu $\theta = 11.25^0$, u kterých může, vzhledem k malému rozdílu kritických sil, dojít působením dispersních vlivů experimentu i k šíření centrální trhliny.

Souběžně s analytickým řešením probíhala pomocí moirové interferometrie i experimentální analýza přetváření vzorků typu Brazílský disk [5]. Tato práce na předchozí sdělení navazuje a uvádí výsledky, které ověřují a doplňují numerické řešení.

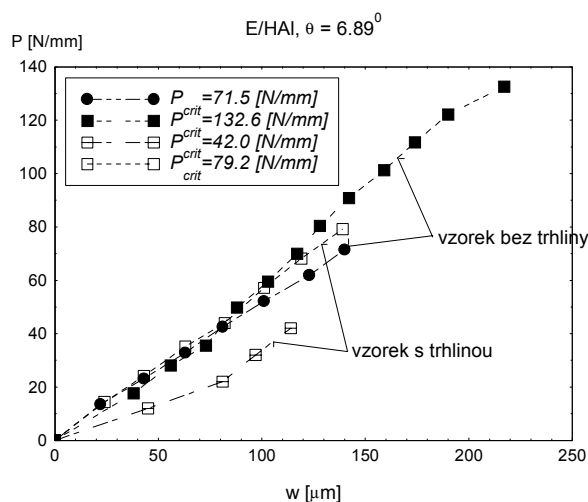
2. EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ A VZORKY

Použitý interferometr pracuje s laserovým světlem o vlnové délce 633 nm. Je vybaven spojitým atenuátorem intenzity ozáření a čtyřpaprskovým kompenzátozem. Detekční soustava interferometru byla upravena pro současný záznam obrazů obou polí posunutí U a V na CCD kameru se záznamovým polem o rozměrech 3.6 x 4.8 mm², které obsahuje 756 x 582

měrných míst. Pro statický záznam jednotlivých interferogramů se rovněž používal digitální fotoaparát Camedia s měrným polem 2800 x 1800 míst.

Pro měření byly použity repliky typické reflexní křížové mřížky s lineární hustotou 1200 čar/mm, které odpovídá světelná interferenční mřížka na povrchu vzorku s lineární hustotou 2400 čar/mm. Citlivost metody je tedy 0.417 μm /proužek.

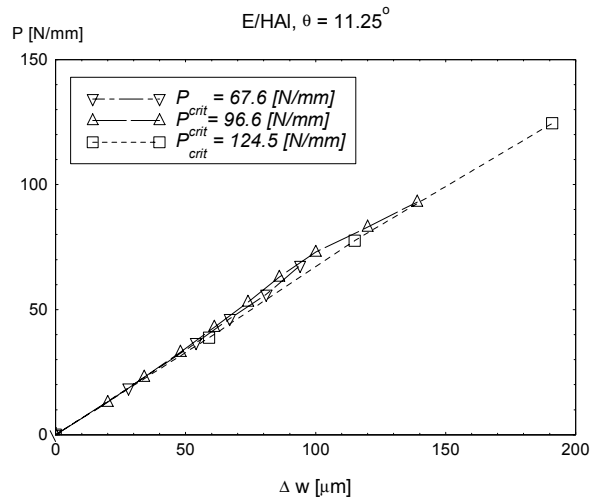
Měřené vzorky byly typu Brazilský disk (poloměr $a = 16.5$ mm, tloušťka $t = 6$ mm) půl na půl (epoxidová pryskyřice (E) s modulem $E = 3.66$ Gpa a Poissonovým koeficientem $\nu = 0.34$ a dural (HA1) s modulem pružnosti $E = 70$ Gpa a smykovým modulem $G = 22$ Gpa). Použitý dural je svými mechanickými vlastnostmi blízký vlastnostem skla, které bylo součástí základního numerického modelu. Vzorky byly lepeny standardním způsobem ve zvláštním přípravku s konstantním zatížením na styku lepidlem Epox z jednoho zdroje. Lepidlo bylo před použitím vždy stejným způsobem vakuováno. Lepené plochy byly před lepením shodně odmaštěny a zdrsňeny. Na zabroušenou lícni stranu slepených vzorků byla s patřičnou orientací (totožnou s orientací použitou ve výpočtech) ve zvláštním přípravku standardním způsobem [6] replikována reflexní křížová mřížka ve tvaru pruhu o šířce přibližně 16 mm. Pozorované pole, vymezené optickou soustavou interferometru, mohlo mít maximální rozměr jen 12 x 18 mm^2 a proto bylo možné sledovat pouze část vzorku – centrální nebo jednu polovinu s okrajem.



Obr. 2

3. VÝSLEDKY A JEJICH DISKUSE

V průběhu experimentu bylo vyhodnotitelným způsobem odzkoušeno celkem 7 vzorků – 3 vzorky s centrální trhlinou a orientací rozhraní $\theta = 11.25^\circ$ a čtyři vzorky s orientací $\theta = 6.89^\circ$, z nichž dva měly centrální trhlinu a dva byly bez trhliny. Ve shodě s doporučeným postupem [5] byly jednotlivé vzorky před konečným zatížením až do poruchy několikrát mírně „zatrénovány“, aby se v přípravku dokonale usadily. Zatěžování probíhalo s průměrnou rychlostí posunu zatěžovacího příčnicku 2 $\mu\text{m}/\text{s}$. Prostou kontrolou odpovídající justáže vzorku před konečným zatížením se ukázal být lineární průběh závislosti působící vnější síly na posunu příčnicku. Uvedené závislosti jsou pro zatížení, která vedla ke kolapsu vzorku znázorněna na Obr.2 a 3. Z doprovodných tabulek na těchto obrázcích je zřejmé, že pokud zkouška proběhla až do poruchy s lineární závislostí, dosažené výsledky kritických sil jsou ve velmi dobré shodě s údaji uvedenými v Tab.1. Nelinearita „pracovního diagramu“ vedla k výrazně odlišným hodnotám P_{crit} , což zřetelněji ukazuje Obr. 2 pro orientaci $\theta = 6.89^\circ$. Kritické síly v případě orientace $\theta = 11.25^\circ$ nepřesáhly hodnoty uvedné v Tab.1.



Kontinuální záznam interferogramů od počátku zatěžování až do poruchy dává možnost opakovaného výběru jednotlivých diskretních případů a jejich zpracování podle potřeby. Na Obr.4 je zobrazen poslední vyhodnotitelný interferogram před porušením vzorku s orientací $\theta = 11.25^\circ$. Zatěžovací vnější síla v tomto případě působí na duralovou část vzorku v místě blízkém okraji rozhraní vzorku Ab. Zpracování a vyhodnocení interferogramu na počítači zahrnuje v časové a funkční posloupnosti řadu kroků (viz např. [7], [8]). Vzhledem k relativně vysoké hustotě proužků byly hodnoty normálních a smykových deformací na sledovaném poli vyhodnoceny na ekvidistantní síti v souřadném systému x,y a poté spojitě interpolovány. Pro šíření trhliny na rozhraní jsou rozhodující hodnoty deformací orientované vzhledem k rozhraní, tj. hodnoty ε_L (podél rozhraní), ε_T (transversálně k rozhraní) a γ_{LT} .

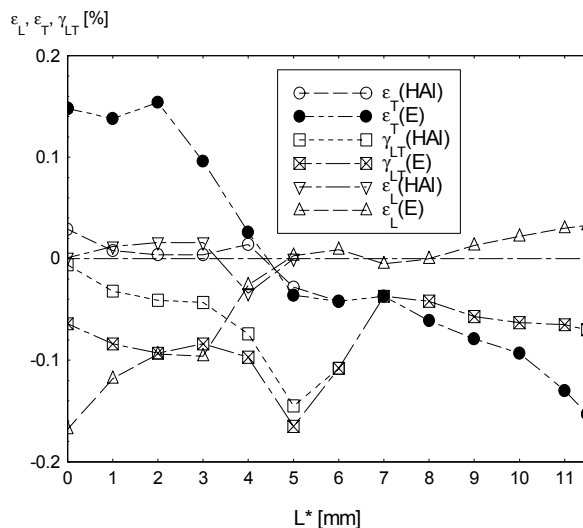
$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ (1/2)\gamma_{LT} \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{ccc} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ (1/2)\gamma_{xy} \end{array} \right\} \quad (2)$$



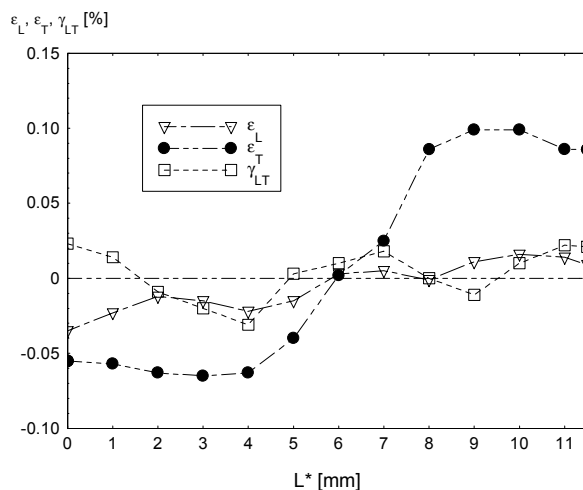
Obr.4

Průběh těchto deformací podél rozhraní mezi body A-Ab pro případ uvedený na Obr.4 je znázorněn na Obr.5. Až do vzdálenosti $L^* \approx 4.7$ mm od původního čela trhliny vykazují všechny složky deformace na rozhraní diskontinuitu svědčící o rozšíření trhliny. Ve zbývající části rozhraní až do okraje vzorku v místě Ab je však hodnota rozhodující příčné deformace

ε_T záporná a vzorek se tedy ve shodě s numerickým výpočtem porušil rozvojem trhliny z místa B nebo Bb. Na Obr.6 je uveden obdobný průběh složek deformace vzorku orientace $\theta = 6.89^\circ$ s centrální trhlinou a sledovaným polem s vnějším zatížením měkčího materiálu. Všechny složky deformace na rozhraní vykazují před poruchou spojitý průběh, v části vzorku před čelem trhliny je příčná deformace záporná, na zbytku rozhraní směrem k jeho okraji kladná. Tato složka v kombinaci se smykovým zatížením způsobila v následujícím okamžiku porušení vzorku smíšeným modem okraje rozhraní v místě Bb.



Obr.5



Obr.6

U jednoho vzorku bez centrální trhliny bylo možno pozorovat rozvoj trhliny z okraje rozhraní. První fáze proběhla „skokem“, tj. rychlostí šíření vyšší než 75 mm/s, kterou je použitá kamera ještě schopna zaznamenat. Další šíření trhliny až do okamžiku poruchy probíhalo kvazistaticky se spojitě vzrůstající rychlostí od 0.01 až do 0.07 mm/s.

Záznamy interferogramů všech provedených experimentů potvrzují, že proces porušení je nespojitý v čase i prostoru. Nevýhodou použitého způsobu sledování rozvoje diskontinuity posunutí (deformace) v pozorovaném poli je skutečnost, že pozorujeme pouze povrchové jevy a nedokážeme odlišit vliv stranového (bočního) okraje rozhraní dvou materiálů. Značným omezením je i ohraňčenost možného sledovaného pole, která vyloučila záznam interferogramu podél rozhraní od okraje k okraji. Nicméně, všechny pozorované jevy byly, vzhledem k povaze problému, s přijatelnou tolerancí ve shodě s očekáváními, která odpovídají použitému analyticko-numerickému modelu.

4. ZÁVĚR

Vyhodnocení a interpretace experimentálních výsledků deformační analýzy rozhraní dvou materiálů s defekty ve formě centrální trhliny konečné délky a infinitesimální okrajové trhliny potvrdily oprávněnost použitého modelu stanovení nestability způsobené iniciací a šířením defektu na hranici dvou materiálů s výrazně odlišnými mechanickými vlastnostmi. Dosažené výsledky podpořily platnost předpokladu, že lomovou houževnatost rozhraní je možné pro oba případy uvedených koncentrátorů napětí stanovit podle Riceova návrhu.

Poděkování

Autoři děkují Grantové agentuře České republiky za účinnou podporu tohoto projektu prostřednictvím grantů 101/97/0730 a 101/00/0941.

Literatura:

- [1] Zemánková, J., Fiala, Z., Vavřík, D.: Interface fracture toughness and problems of its interpretation. *Acta Technica CSAV*, **39**, 1994, 536-578
- [2] Fiala, Z.: Complex stress intensity factors for a crack in a bimaterial Brazilian test specimen. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, **17**, 1994, 909-918
- [3] Fiala, Z., Zemánková, J.: Problems in determination of interface fracture toughness by Brazil nut specimen. *Proceed. Euromech Colloquium 358: Mechanical Behaviour of Adhesive Joints*, Eds. R.D.Adams, S.Aivazzadeh, A.H.Cardon, A.Rigolot, 1997, 93-104
- [4] Fiala, Z., Zemánková, J.: Krajová nestabilita u rozhraní dvou materiálů. *Sborník Metodické a aplikační problémy lomové mechaniky*, Žinkovy, 1999
- [5] Minster, J., Fiala, Z., Václavík, P.: Současné sledování polí posunutí U a V v moirové interferometrii. Sb. 37. mezinár. konf. *Experimentální analýza napětí EAN'99*, Frenštát p/R, 115-118
- [6] Post, D.: Moire interferometry for Composites. *Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites*, Eds. R.L.Pendelton, M.E.Tuttle, SEM, 1989
- [7] Minster, J., Václavík, P., Fiala, Z., Valach, J.: Hodnocení deformační odezvy pomocí moire-interferometrie. *Sb. Inženýrská Mechanika '97*, Svatka, Vol.1, 147-152
- [8] Minster, J., Valach, J., Fiala, Z., Václavík, P.: Počítačově podporované zpracování interferogramů deformačního pole v okolí otvoru v ortotropní smykově zatížené stěně. *Sb. XIX. Vyztužené plasty*, Karlovy Vary, 1997, 136-143