EAN '95 33rd Conference of Experimental Stress Analysis
33. konference o experimentální analýze napětí
5. - 8.6.1995, Třešť, Czech Republic

MEASURING OF BIMATERIAL INTERFACE FRACTURE TOUGHNESS

MĚŘENÍ LOMOVÉ HOUŽEVNATOSTI MATERIÁLOVÝCH ROZHRANÍ

Zemánková J., Fiala Z.

Abstract. The methods of interface fracture toughness measuring (IFT) are described. Own approach of the IFT determination is outlined based on using variations of the Brazil Nut Specimen. Fracture toughness of the glass/epoxy interface as the function of crack tip mixity was measured and it was found out strongly depending on the geometrical arrangement of specimen.

Potřeby technologií vytváření povrchových vrstev a složených materiálů, jakož i narůstající doklady o klíčové roli materiálových rozhraní pro jejich bezpečnou a spolehlivou exploataci, vedly v nedávné době ke vzniku nové větve lomové mechaniky - *lomové mechaniky rozhraní* (LMR). Její koncepce byla navržena J.R.Ricem [1] tak, aby překonala problémy oscilující singularity složek napětí a posuvů u kořene trhliny v rozhraní. Je vystavěna, obdobně jako klasická lomová mechanika, na G-kriteriu jako lomovém parametru. Jelikož však v případě trhlin v rozhraní vzniká na jejich čele vždy imanentně smíšený mód namáhání, musí být odpor proti šíření trhliny v rozhraní neboli lomová houževnatost rozhraní (LHR) měřena prostřednictvím kritické hodnoty rychlosti uvolňování deformační energie G_{ic}. Ta tu z uvedených důvodů nemůže být jedinou bimateriálovou konstantou, ale záleží na poměrném zastoupení smykového a tahového zatížení čela trhliny, tzv mixitě Ψ. Její velikost, ovlivňující mechanismy přispívající k hodnotě LHR, spoluutváří jednak charakter vnějšího namáhání, jednak rozdílnost elastických konstant vázaných materiálů. Teoretický základ LMR je v češtině uveden v práci [2].

Mechanické chování rozhraní, které prokazatelně nejvíce ovlivňuje "pevnostní" vlastnosti či houževnatost jak kompozitů tak povrchových vrstev a povlaků, je stále ještě málo zmapováno. Snaha měřit klasickými metodami kohesní či adhesní pevnost rozhraní se příliš neosvědčila, jelikož měřené hodnoty těchto veličin měly nesmírný rozptyl a byly silně závislé na tvaru a velikosti vzorků i uspořádání testu. To se ostatně dalo očekávat, neboť je to typické pro veškerá vysoce křehká prostředí. A tím bezesporu rozhraní je. Tyto pokusy tedy jen zdůraznily nedostatečnosti fyzikální definice i interpretovatelnosti běžné inženýrské veličiny

jakou je "materiálová pevnost". Očekávalo se proto, že lomová houževnatost rozhraní bude adekvátnější a spolehlivější charakteristikou kvality bimateriálových rozhraní a že v ní technologové získají vhodný nástroj pro klasifikaci svých postupů a návrhaři spolu s lomovou mechanikou rozhraní moderní metodiku odhadu bezpečnosti či životnosti konstrukcí vytvářených ze složených materiálů. Tato vyhlídka stála za překonání obtíží spojených s teoretickou náročností LMR a vývojem metodiky normovaného určování LHR.

Teoretickou náročností vývoje případné metodiky měření LHR je míněn výpočet (dostupný téměř výlučně numerickými metodami) G_i, Ψ- kalibračních funkcí. To znamená výpočet průběhu hnací síly trhliny a složek komplexního faktoru intenzity napětí na čele trhliny v rozhraní bimateriálového vzorku zvoleného tvaru, geometrie a zatěžování v závislosti na mixitě vnějšího zatěžování, a výpočet stejné závislosti pro vnitřní mixitu na čele trhliny. Jde o problém řešení napjatosti a lomových charakteristik při smíšeném módu a oscilující singularitě. K tomu jsme v našem případě užili MKP a v ČR celkem nový přístup kombinace křivkových integrálů a pomocného singulárního pole, který umožňuje separaci složek komplexního faktoru intenzity napětí a tedy i mixity se značnou přesností pomocí jednoduchého post-procesingu [3].

Experimentální část hledání vhodné metodiky pro určování LHR si klade v první řadě za cíl výběr vhodného vzorku a jeho zatěžování, tak, aby bylo bez velkých technických potíží umožněno proměření G_{ic} přes co nejširší možný rozsah mixity. Za tímto účelem byla navržena celá řada vzorků a způsobů zatěžování [4] splňujících daný cíl s různou mírou úspěšnosti. Jmenujme například čtyřbodový ohyb dvouvrstevného vzorku (tzv. 4p.-UCSB), ohybový vzorek s okrajovým defektem, dvojvrstvový vzorek mezi pevnými svorkami při namáhání jejich posuvem, různé varianty sendvičových vzorků, kde rozhraní tvoří základní materiál s tenkou vložkou druhého materiálu (např. ve variantě DCB či Brazilský sendvičový ořech - BNS). Pro naše účely jsme zvolili a zpracovali metodiku vázanou na vzorek typu Brazilský disk včetně jeho sendvičové varianty. Podotkněme, že sendvičové vzorky mají značně usnadněnou teoretickou kalibraci, neboť byl pro ně odvozen univerzální vztah mezi komplexním faktorem intenzity napětí trhliny v rozhraní a faktory intenzity napětí klasického I a II módu spojenými s toutéž konfigurací vzorku a trhliny v homogenním materiále [5] :

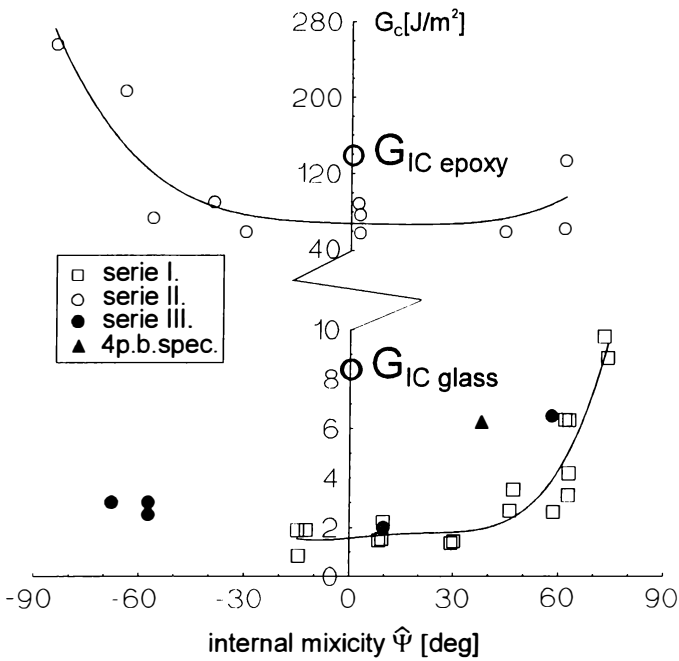
$$K_1 + iK_2 = p.(K_I + iK_{II})h^{i\varepsilon}.e^{i\omega}$$

kde $p = \left(\frac{1-\alpha}{1-\beta^2}\right)^{1/2}$

Zde $\alpha, \beta, \varepsilon, (\mu, \nu)$ jsou Dundursovy kompozitní parametry (eventuelně modul pružnosti ve smyku a Poissonovo číslo), h tloušťka vložky, ω je funkcí α,β která je v práci [5] uvedena v tabelární podobě.

Zatěžování Brazilského disku s centrální trhlinou se realizuje dvojicí lokálních protilehlých tlakových sil, což je zejména pro křehké materiály výhodné. Tato konfigurace

rovněž umožňuje změnou úhlu mezi rovinou sil a trhliny proměřit téměř úplný rozsah mixity módů. Nevýhodou je však existence dvou vrcholů iniciační trhliny a z toho plynoucí potřeba registrace místa počátku nestability během zkoušky, neboť se ztrácí symetrie podmínek namáhání v kořeni trhliny.



OBR. 1 Závislost lomové houževnatosti rozhraní sklo-epoxi na mixitě v kořeni trhliny

Proměření průběhu lomové houževnatosti $G_{ic} - \hat{\Psi}(\hat{r} = 1mm)$ pro rozhraní epoxidová pryskyřice - sklo (obr.1) nám umožnilo nejen ověřit funkčnost zvolené metodiky, ale současně diskutovat správnost koncepce LMR [6]. Jediným problémem metodiky bylo udržení směru šíření iniciační trhliny v rozhraní a iniciace porušení v kořeni apriorní trhliny, nikoliv u okraje rozhraní. Odstranění těchto případných nedostatků souvisí s druhým problémem, totiž správností koncepce. Zdá se, že tato rovněž prokazuje nejzávažnější slabinu klasické LM, to jest, že lomovou houževnatost nelze považovat za (bi-) materiálovou charakteristiku, ale že je silně závislá na velikosti a geometrii zkušebního tělesa. Je tedy zpochybněna možnost přenosu této hodnoty na jiné konfigurace těles při bezpečnostní analýze. Domníváme se, že tento porušený axiom LM svědčí rovněž o nedostatečné obecnosti či vůbec správnosti celé koncepce lomové mechaniky.

Přesto vše lze potvrdit význam této metodiky jako vhodného nástroje při *kvalitativním* hodnocení vlivu různých technologických faktorů na jakost a funkčnost rozhraní a spojů za předpokladu podržení stejného způsobu namáhání a stejné konfigurace vzorku s trhlinou.

Poděkování. Zpracování této problematiky bylo možné díky podpoře v rámci grantu AV ČR číslo 27 104.

Literatura

1. Rice J.R.: Elastic FM concept for interfacial cracks. Journal Appl. Mech.,55, March 1988, p.98
2. Zemánková J.: Lomová mechanika rozhraní a porušování složených materiálů. Strojnícky časopis, 43, 1992, č. 4, str. 298
3. Fiala Z.: Complex SIFs for a crack in a bimaterial Brazilian test specimen. Fatigue and Fracture Engn. Mater. Struct., Vol. 17, No 8, 1994, p. 909
4. Zemánková J.: Úloha rozhraní při porušování kompoz. a složených materiálů. VZ ÚTAM AV ČR, Praha 1991
5. Suo Z., Hutchinson J.W.: Sandwich test specimens for measuring interface fracture toughness. Mater. Science and Engn., A 107, 1989, p. 135
6. Zemánková J., Fiala Z., Vavřík D.: Interface fracture toughness and problems of its interpretation. Acta Technica CSAV 39, 1994, p. 563

Jaroslava Zemánková, Ing. CSc., ÚTAM AV ČR, Prosecká 74, 190 00 Praha 9
Zdeněk Fiala, RNDr, CSc., ÚTAM AV ČR, Prosecká 74, 190 00 Praha 9
Tel.: 882334 (l. 206, 207), FAX: 884634