

ISIDOR ĐORĐEVIĆ¹
MILAN GORDIĆ²
DANIJELA PEŠIKAN¹
MOMČILO STEVANOVIĆ¹

¹Institut za nuklearne nauke
"Vinča", Beograd

²Opšta gimnazija "Milutin
Milanković", Beograd

NAUČNI RAD

546.26-037 + 678.686:67.017:
:539.55.004.63

SPECIFIČNOST MERENJA INTERLAMINARNE ŽILAVOSTI LOMA METODOM MODE I*

U radu su vršeni testovi merenja interlaminarne žilavosti loma metodom Mode I, i prikazani su praktični problemi koji se javljaju pri sprovođenju metode. Kao ispitivani materijal korišćen je unidirekcionni kompozit karbonska vlakna/epoksidna smola. Kompozit je dobijen toplim presovanjem u kalupu komercijalnog preprega firme Hexcel Ply. Predložene su tehnike formiranja inicijalne pukotine, rešavanje problema primene opterećenja na uzorak, i precizno registrovanje rasta pukotine. Pouzdanost predložene metode izvršena je procenom varijanse dobijenih rezultata, kao i poređenjem sa rezultatima iz literature.

Primena konstrukcionih kompozitnih materijala doživljava svoju punu ekspanziju poslednjih dvadeset godina. Karbon-epoksi kompoziti nekada korišćeni isključivo u naprednim tehnologijama kao što je izrada materijala za svemirske letelice, danas nalaze primenu u auto i avio industriji, proizvodnji sportskih rekvizita, građevinarstvu itd. Sasvim logično javila se i potreba za modelovanjem ovakvih materijala, uticajem građe, ivičnih efekata, rupa, odnosno proučavanju ponašanja materijala u realnim uslovima primene [1]. Jedna od bitnijih odlika CBRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) kompozita je izražena anizotropija tako da se bilo koja prognoza osobina bitno komplikuje u odnosu na klasične konstrukcione materijale kao što su čelici, keramika itd.

Primena mehanike loma i na najjednostavnije unidirekcionne kompozite ograničena je na određivanje brzine oslobađanja energije deformacije loma G_I , definisane kao porast energije stvaranja površine indukovan rastom pukotine [2]. Delaminacija kompozita se opisuje pomoću dva granična modela: Mode I gde do laminacije dolazi usled čistog zatezanja između slojeva (rascepljivanje), i Mode II gde do širenja pukotine dolazi smicajnim naprezanjem [3]. Naravno da su najčešće oba mehanizma uključena u delaminaciju kompozita tako je razvijeno i dosta metoda koje predstavljaju spoj prethodno navedena dva granična slučaja.

U radu je ispitan uticaj vizuelnog praćenja rasta pukotine na pouzdanost određivanja interlaminarne žilavosti loma CBRP kompozita, procenom srednje greške rasipanja rezultata, i poređenjem sa literatur-

nim rezultatima. Pregledom literature utvrđena je značajna neusaglašenost dobijenih rezultata, tako da su autori hteli dati svoj doprinos razvoju metode, koja je nova i još uvek u razvoju bez precizno definisanih standarda.

EKSPERIMENTALNI DEO

Unidirekcionni CFRP kompozit je dobijen tehnikom toplog presovanja u kalupu komercijalnog preprega HexPly 6376 na temperaturi od 175 °C. Ploče su dobijene slaganjem 26 slojeva preprega, i postignuta je debljina ploča od 3,05 mm odnosno debljina od 0,117 mm po sloju. U cilju formiranja inicijalne pukotine korišćena je teflonska PTFE folija debljine 13 μ m koja je ubačena u sredinu ploče između 13. i 14. sloja. Umetanje inserta radi dobijanja inicijalne pukotine je uobičajena tehnika s time što neki autori navode samo podatak da se radi o nevezujućem insertu [4], dok drugi autori kao insert koriste polimidni film različitih debljina [5,6]. Po Olssonu [7] debljina inserta ima značajan uticaj na rezultat žilavosti loma, jer deblji insert može dovesti do narušavanja strukture kompozita i formiranja takozvanih džepova sa smolom na obodima inserta.

Dimenzije epruvete (3.05×25×125 mm) i uslovi merenja žilavosti loma usaglašeni su sa ISO15024 standardom [8]. Izgled epruvete, sa određenom nomenklaturom prikazan je na slici 1.

Eksperimenti su izvođeni na univerzalnoj mašini za mehanička ispitivanja Instron 1185M. Za hvatanje uzorka korišćene su pneumatske čeljusti, dok je pravac opterećenja obezbeđen pomoću samocentrirajućeg zgloba. Izgled aparature prikazan je na slici 2. Brzina mosta u skladu sa datim standardom iznosila je 5 mm/min.

Interlaminarna žilavost loma G_{IC} računata je po sledećem obrascu [8]:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \quad (1)$$

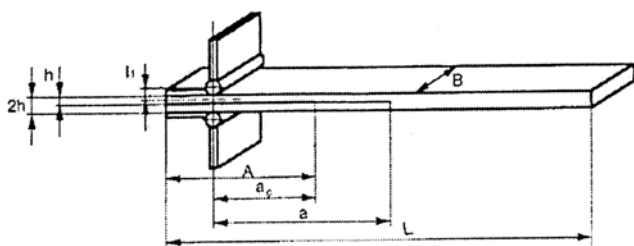
*Rad saopšten na skupu "Peti seminar mladih istraživača", Beograd, Decembar 25-26, 2006.

Adresa autora: I. Djordjević, Institut za nuklearne nauke "Vinča", POB 522, 11000 Belograd

E-mail: isidor@vin.bg.ac.yu

Rad primljen: Decembar 25, 2007.

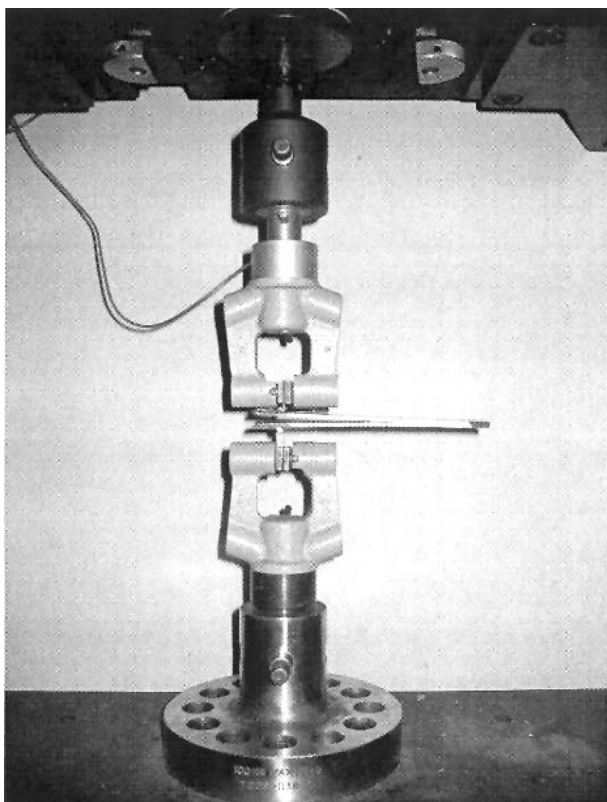
Rad prihvaćen: Februar 06, 2007.



Slika 1. Izgled epruvete za mehaniku loma Mode I

Figure 1. Test tube for mechanical fracture measurement by mode I

Nomenklatura: L – Dužina epruvete, b – Širina, 2h – ukupna debljina, A – širina inserta, a_0 – širina inicijalne pukotine, a – širina pukotine, l_1 – rastojanje od inserta do centra šarke



Slika 2. Ilustracija aparature sa postavljenim uzorkom

Figure 2. Apparatus with sample

gde je: P – sila, δ – vertikalni pomeraj (otvaranja epruvete).

Parametar F predstavlja koercioni faktor i definiše se sledećom jednačinom [8]:

$$F = 1 - \frac{3}{10} \left(\frac{\delta}{a} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\delta l_1}{a^2} \right) \quad (2)$$

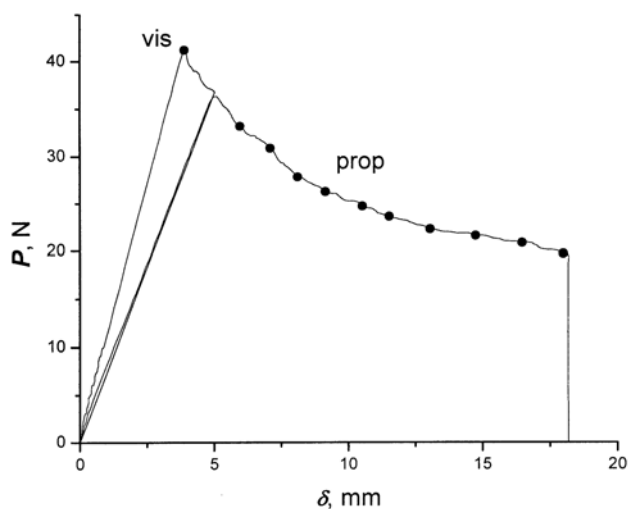
Parametar Δ se definiše kao odsečak na x–osi konstruisanjem dijagrama zavisnosti $C^{1/3}$ od a . Popustljivost sistema C je definisana kao odnos pomeraja i opterećenja, δ/P .

Iz priloženog se vidi da je potrebno kontinualno pratiti 3 parametra. To su sila P , vertikalni pomeraj δ

i rast pukotine a . Prve dve veličine se jednostavno očitavaju na pisaču uređaja, dok se javlja problem preciznog određivanja rasta pukotine. U ovom radu je primenjena najjednostavnija tehnika, vizuelnog praćenja rasta pukotine. Korektorskim lakom i markerom je isertana milimetarska skala na bočnim ivicama epruvete i rast pukotine je praćen vizuelno. Registrovan je pomeraj pukotine na svakih 5 mm. Tehnika vizuelnog praćenja rasta pukotine se već pokazala kao jednostavna i praktična [4,6]. Eventualno povećanje preciznosti praćenja rasta pukotine moglo bi se postići montiranjem pokretnog optičkog mikroskopa [5]. Kao jedna od mogućnosti praćenja rasta pukotine kod FBRP kompozita zasniva se na promeni električne otpornosti kompozita odnosno na razlici u električnoj provodnosti vlakana u pravcu ose i poprečno na osu vlakna [9].

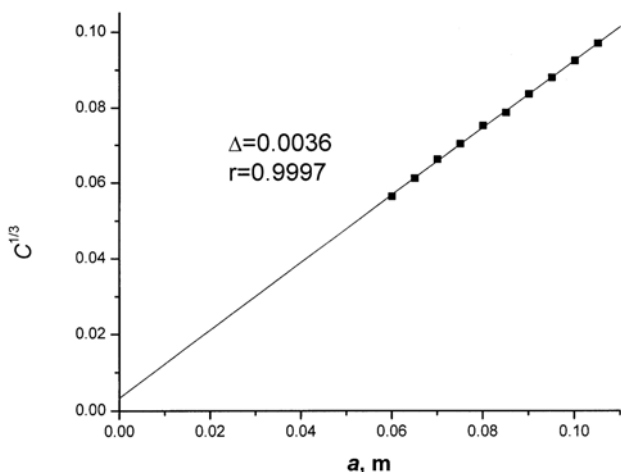
REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 3 je prikazan tipičan dijagram P – δ za jedan od uzoraka. Na dijagramu je obeležena VIS tačka, odnosno tačku kada je uočen početak delaminacije. U konkretnom slučaju praćena je delaminacija u dužini od 4 mm. Zatim je vršeno rasterećene uzorka, i provereno da li je laminacija ravnomerno krenula celom širinom uzorka. PROP tačke predstavljaju pomeraje pukotine duž epruvete i svaka tačka predstavlja pomeraj od 5 mm.

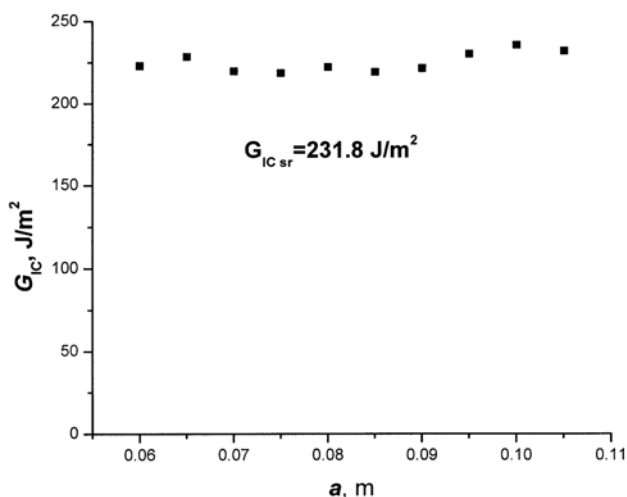
Slika 3. Grafički prikaz zavisnosti P – δ Figure 3. Graphical presentation of P vs. δ

Na slici 4 je prikazan dijagram zavisnosti $C^{1/3}$ – a , odnosno proračun parametra Δ .

Linearno fitovanje eksperimentalnih podataka je izvršeno u programskom paketu Origin 6.0, i postignuto je dobro korelisanje sa eksperimentalnim tačkama. Koeficijent korelacije je $r = 0,9997$.



Slika 4. Grafički prikaz zavisnosti $C^{1/3}$ - a
Figure 4. Dependence of $C^{1/3}$ vs a



Slika 5. Grafički prikaz zavisnosti G_{IC} - a
Figure 5. Dependence of G_{IC} vs a

Zavisnost G_{IC} u funkciji a prikazana je na slici 5. Zapaža se da vrednost G_{IC} nije jednoznačno definisana već osciluje oko jedne vrednosti uz određena odstupanja duž epruvete.

Iz tabele 1 se zapaža da je koeficijent varijacije (*c.v.*) prilično veliki (približno 10%). Proverom literaturnih podataka zapaža se da se *c.v.* i kod ostalih autora kreće u granicama od 10, pa čak i do 14% (tabela 2).

Pošto su korišćene različite tehnike merenja rasta pukotine može se pretpostoviti da do rasipanja dolazi usled same prirode materijala i velike

Tabela 1. Sumirani rezultati za vrednosti G_{IC} merenih metodom mode I

Table 1. Fracture toughness, G_{IC} determined by mode I

Broj uzoraka	G_{IC} , J/m ²	<i>c.v.</i>
7	238,8 ± 24,1	10,1 %

Tabela 2. Podaci iz literature za vrednosti G_{IC} merenih metodom mode I

Table 2. Literature values of G_{IC} determined by mode I

Literatura	Prepreg	G_{IC} , J/m ²	<i>c.v.</i>	Napomena
Asp [5]	Hex 6376	219,5	13,6	Pokretni mikroskop
Hug [4]	T300/914	186		Vizuelno
Mathews [3]	AS4/3501-6	116	13	8 epruveta

anizotropije, a ne zbog greški očitavanja brzine rasta pukotine. U literaturi 5 je pronađen i podatak za žilavost loma na sobnoj temperaturi za Hex Ply 6376 i potvrđene su približno slične vrednosti interlaminarne žilavosti loma, kao i približno slične vrednosti koeficijenta varijacije *c.v.*

Pošto nije pronađen veći broj podataka za Hex Ply 6376 prepreg u literaturi, radi bolje ilustracije, prikazana je tabela 3, sa preuzetim rezultatima iz literature 3 za prepreg AS4/3501 takode sa ugljeničnim vlaknima i epoksidnom smolom, i zapaža se velika neusaglašenost eksperimentalnih rezultata, i velika odstupanja.

Tabela 3. Uporedni rezultati za prepreg AS4/3501 preuzeti iz literature [3]

Table 3. Comparison of interlaminat fracture toughness for AS4/3501

Material	G_{IC} , J/m ²	G_{IIC} , J/m ²	Reference
AS4/3501	116	646	Methews
	136	740	Cairns
	111	814	Hooper and Subramanian
	69	560	Reeder
	81	554	Adams et al.

ZAKLJUČAK

Izvedeno je eksperimentalno merenje interlaminarne žilavost loma unidirekcionog CFRP kompozita metodom mode I. Praćenje rasta pukotine vršeno je vizuelno, iscrtavanjem milimetarske skale na bočnim ivicama epruveta. Za Hex 6376 prepreg, dobijene su vrednosti za interlaminarnu žilavost loma, $G_{IC} = 238,8$ J/m² uz rasipanje rezultata od 10,1%. Pri tome je utvrđeno da proračun parametra Δ ne unosi značajniju grešku, i da preciznost dobijenih rezultata nije uslovljena preciznošću očitavanja rasta pukotine, već do rasipanja rezultata dolazi usled same prirode materijala i njegove anizotropije. Na osnovu ovoga može se zaključiti da je metoda merenja G_{IC} sa vizuelnim praćenjem rasta pukotine jednostavna i lako primenljiva, i daje zadovoljavajuće rezultate za procenu vrednosti G_{IC} .

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansiran od strane Ministarstva nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije, projekat No. 142016.

LITERATURA

- [1] J. Sancho, A. Miravete, *Composite Structures* **76** (2006) 283–290.
- [2] M. Stevanović, *Vlaknima ojačani kompozitni materijali*, Pertenon, Beograd, 2003, str. 157.
- [3] M.J. Mathews, S.R. Swanson, *Compos. Sci. Technol.* **67** (2007) 1489–1498.
- [4] G. Hug, P. Thevenet, *Engineering Fracture Mechanics* **73** (2006) 2456–2462.
- [5] L. Asp, *Compos. Sci. Technol.* **58** (1998) 967–977.
- [6] Hojo M., Matsuda S., *Compos. Sci. Technol.* **66** (2006) 665–675.
- [7] Olsson R., *Investigation of delamination criticality and the transferability of growth criteria*, FFA TN 1996–31, The Aeronautical Research Institute of Sweden, 1996.
- [8] *Fibre-reinforced plastic composites—Determination of mode I interlaminar fracture toughness, G_{IC} for unidirectionally reinforced materials*, International Standard ISO 15024, 2001.
- [9] A. Todoroki, M. Tanaka, *Compos. Sci. Technol.* **63** (2003) 1911–1920.

SUMMARY**THE DISTINCTIVENESS OF MEASURING INTERLAMINAR FRACTURE TOUGHNESS BY THE MODE I METHOD**

(Scientific paper)

Isidor Djordjević¹, Milan Gordić², Danijela Pešikan¹, Momčilo Stevanović¹

¹Institute of Nuclear Sciences "Vinča", POB 522, 11000 Belgrade

²Grammer school "Milutin Milanković", Dr Milivoja Petrovića 6, 11090 Belgrade

Practical problems in measuring the interlaminar fracture toughness by the mode I method were pointed out in this paper. Unidirectional carbon fibre/epoxy resin composite was used in the experiments (as the test material). The composite was obtained by curing commercial Hexcel ply 6376 in a mould. The techniques of initial crack formation, solving problems of applying the correct stress on the specimen and the precise registering of crack growth were proposed. The reliability of suggested method was assessed by evaluating the dispersion of the results obtained, as well as by comparison with the literature data.

Key words: Carbon fiber • Mechanical properties • Carbon fiber-epoxy resin composites • Fracture toughness • Mode I •

Ključne reči: Ugljenična vlakna • Mehaničke osobine • Karbon-epoksi kompoziti • Žilavost loma • Mode I •