

ALEKSANDAR M. KOJOVIĆ¹
IRENA D. ŽIVKOVIĆ²
LJILJANA M. BRAJOVIĆ³
DRAGAN MITRAKOVIĆ¹
RADOSLAV R. ALEKSIĆ¹

¹Tehnološko–metalurški fakultet,
Beograd

²Institut bezbednosti, Beograd

³Građevinski fakultet, Beograd

NAUČNI RAD

66.017:620.1:681.586.5:620.19

DETEKTOVANJE OŠTEĆENJA U LAMINARNIM TERMOPLASTIČNIM KOMPOZITNIM MATERIJALIMA KORIŠĆENJEM UGRAĐENIH OPTIČKIH VLAKANA

Ovaj rad istražuje mogućnost primene optičkih vlakana kao senzora za ispitivanje oštećenja laminarnih termoplastičnih kompozitnih materijala nastalih usled udara niske energije, u realnom vremenu. Ispitivanje materijala na otpornost pri udaru niske energije, različitih nivoa, je vršeno Šarpijevim klatnom radi pronalazjenja metodologije za komparativna merenja rezultujućih oštećenja u materijalu. Iz tog razloga su u uzorke kompozitnih materijala sa ojačanjem u vidu kombinacije Kevlara 129 i metalne mrežice, ili Kevlara 129 i termoplastičnim poli(vinil butiralom) kao matricom, ugrađeni fiberoptički senzori intenzitetnog tipa. Dobljeni rezultati su potvrdili opravdanost upotrebe optičkih vlakana kao senzora za detekciju oštećenja u laminarnim termoplastičnim kompozitnim materijalima u realnom vremenu.

Pored klasičnih metoda za detekciju oštećenja u kompozitnim materijalima sa polimernom matricom (ultrazvuk [1], akustična emisija [2,3]), fiberoptički senzori (FOS) se široko koriste za nadziranje i preciznu procenu ponašanja materijala tokom proizvodnje i eksploatacije. Upotrebljavaju se različite FOS konfiguracije uglavnom u zavisnosti od vrste i svojstava optičkih vlakana [4–6]. Oblik i struktura intenzitetnih FOS omogućava njihovu jednostavnu ugradnju bez degradacije njihovih osnovnih mehaničkih karakteristika, te ih je moguće koristiti kao pouzdane, dugoročne automatske senzore za detekciju oštećenja i deformacija u realnom vremenu. [7–8].

Do danas većina istraživanih kompozita sadrži termoreaktivne polimere kao matricu. Preliminarna istraživanja na termoplastičnom kompozitnom materijalu aramidno vlakno / poli(vinil butiral) [9] su pokazala da ovaj materijal može absorbovati 5.5 puta veću energiju od tradicionalno upotrebljavanih materijala sa istim ojačanjem ali mehanizmi absorpcije energije nisu adekvatno objašnjeni. Predmet istraživanja u ovom radu je određivanje kvaliteta pomenutih materijala, kroz poređenje absorbovane energije pri udarima Šarpijevim klatnom, upotrebom ugrađenih FOS intenzitetnog tipa.

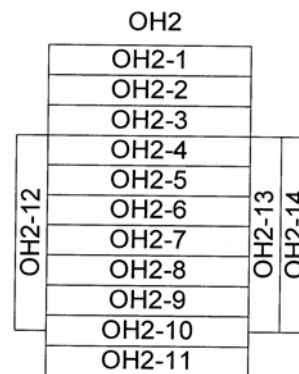
EKSPERIMENT

Uzorci

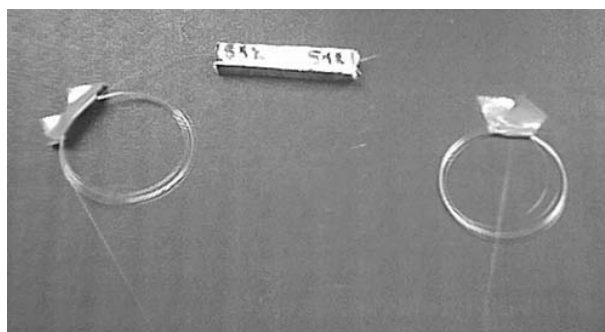
Uzorci su imali ojačanje u vidu aramidne tkanine (KOJA 1, KOJA 4 i KOJA 5), ili u kombinaciji aramidne tkanine i metalne mrežice, u odnosu 1:1 (OH2) ili 2:1 (OH4). Tanke poli(vinil butiral) (PVB) folije su korišćene kao matrica.

Svaki uzorak je izdvojen na više epruveta. Slika 1 prikazuje šablon isecanja epruveta za uzorak OH2. Pre-

Adresa autora: A. Kojović, Tehnološko-metalurški fakultet, Karnegijeva 4, 11000 Beograd
E-mail: koja@tmf.bg.ac.yu
Rad primljen: Novembar 1, 2005
Rad prihvaćen: Avgust 1, 2006



Slika 1. Raspored epruveta na uzorku OH2
Figure 1. Pattern of specimens in sample OH2

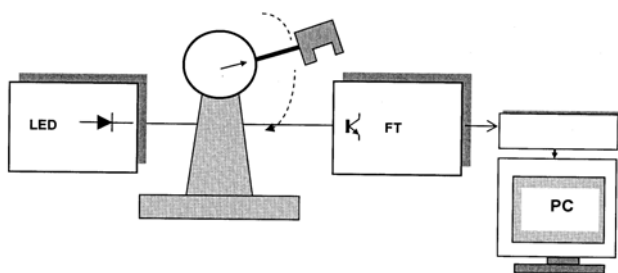


Slika 2. Epruveta sa ugrađenim optičkim vlaknom
Figure 2. Specimen with embedded optical fiber

ostali uzorci su isečeni po istom principu. Fotografija jedne od epruveta sa ugrađenim optičkim vlaknom je prikazana na slici 2.

Opis eksperimenta

Transmisioni tip intenzitetnih FOS je konfigurisan na ugrađenom fiberoptičkom vlaknu [11], kao što je to prikazano na slici 3. Svetlost iz emitterske diode (840



Slika 3. Merni sistem
Figure 3. Measurement system



Slika 4. Držać uzorka
Figure 4. Specimen placeholder

nm) je propuštena kroz ugrađeno fiberoptičko vlakno do detektora baziranog na foto tranzistoru.

Izlazni signal iz foto detektora povezan je na akvizicioni sistem baziran na A/D kartici i personalnom računaru. Korišćeno je vreme uzorkovanja od 1 μ s pri čemu je merenje trajalo 190 ms nakon i 10 ms pre udara. Svaki uzorak je pričvršćen kao što je to prikazano na slici 4.

Mesto udara Šarpijevog klatna na kome se javlja deformacija materijala i promena intenziteta signala u optičkom vlaknu, prikazano je na istoj slici. Korišćene su tri različite energije udara (1,5 J, 1,3 J i 1,05 J) kao što je prikazano u tabeli 1. U svim slučajevima je približno 0,1 J energije zadržano u klatnu. Udar je sniman digitalnom kamerom i energija vraćena klatnu je proračunata iz ugla koje je klatno doseglo nakon odbijanja od materijala. Sekundarni udarac je sprečavan manualno.

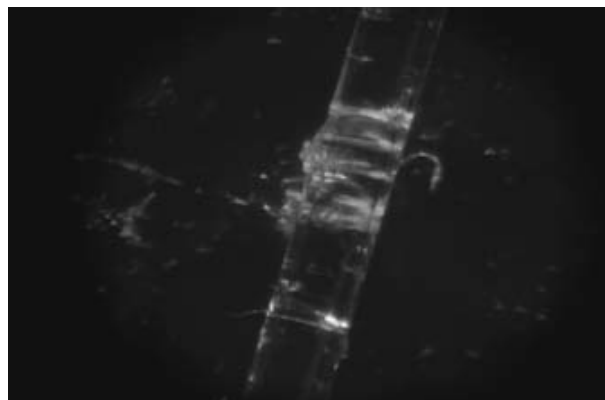
Tabela 1. Energija primenjivana na epruvete
Table 1. Energy applied to the specimens

Uzorak	Energija		
	1,4 J	1,2 J	0,95 J
OH ₂	1-7	8-14	-
OH ₄	1-7	12-14	8-11
KOJA1	1-9	-	-
KOJA4	-	9-14	-
KOJA5	1-5	6-12	13-15

REZULTATI I DISKUSIJA

Razvoj oštećenja u optičkom vlaknu nakon više udara niske energije se može videti na slici 5.

U tabeli 2 je prikazan broj udara koje je svaka od epruveta izdržala pre pucanja optičkog vlakna. Ako se



Slika 5. Razvoj oštećenja u optičkom vlaknu
Figure 5. Development of damage in the optical fiber

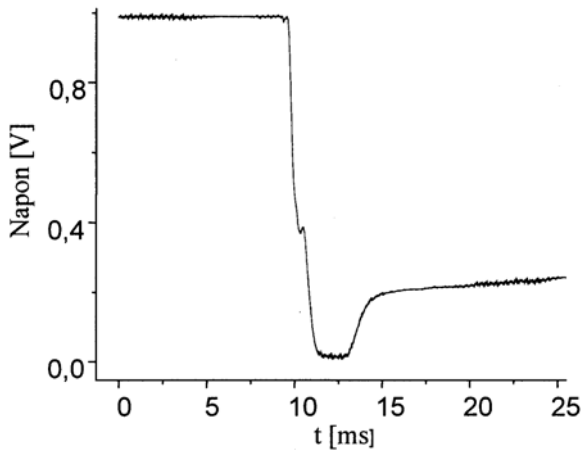
Tabela 2. Broj udara pre kritičnog oštećenja
Table 2. Number of impacts before fatal damage occurs

Epruveta	Uzorak				
	OH2	OH4	KOJA1	KOJA4	KOJA5
1	3	2	3	-	3
2	5	7	4	-	7
3	6	3	5	-	7
4	6	-	4	-	8
5	5	2	5	-	8
6	6	3	6	-	10
7	5	7	6	-	9
8	5	10	4	-	-
9	4	13	6	3	4
10	5	8	-	2	2
11	4	8	-	1	-
12	2	6	-	8	8
13	3	7	-	4	11
14	3	6	-	7	10
15	-	-	-	-	23

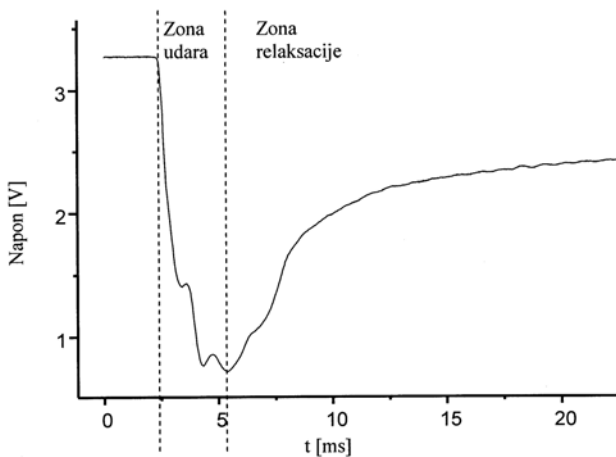
rezultati iz ove tabele uporede sa šablonom isecanja epruveta i primenjenom energijom moguće je zaključiti da epruvete isečene sa ivica uzorka imaju manju otpornost.

Pri udarima veće energije (čiji nivo zavisi od tipa uzorka) dolazi do pada signala u optičkom vlaknu na nultu vrednost. Ovaj deo signala ne daje nikakvu informaciju o razvoju oštećenja u materijalu. Da bi se dobijeni signali mogli koristiti za analizu, energija udara mora biti ispod ovog nivoa. Primer ovakvog signala moguće je videti na slici 6.

Karakterističan oblik signala tokom udara prikazan je na slici 7. Nivo signala tokom udara, koji je direktno proporcionalan intenzitetu svetlosti propuštenom kroz optičko vlakno, naglo opada, a zatim se vraća ka početnoj vrednosti. Na slici 7 je moguće jasno prepoznati dve zone u skladu sa odgovorom materijala na primenjeno



Slika 6. Primer signala kada je energija udara isuviše velika
Figure 6. Example of a signal when the applied energy is too large



Slika 7. Karakterističan oblik signala tokom udara
Figure 7. Characteristic shape of the signal during impact

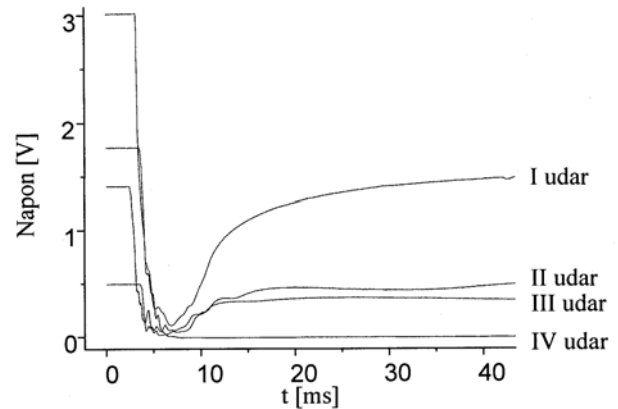
opterećenje. Prva zona predstavlja zonu udara i traje približno 4 ms. Druga zona predstavlja zonu relaksacije materijala.

Konačni rezultat relaksacije je moguće videti kao početnu vrednost krive merenja pri sledećem udaru, za istu epruvetu. Signal nikad potpuno ne dostiže početnu vrednost što se može videti na slici 8.

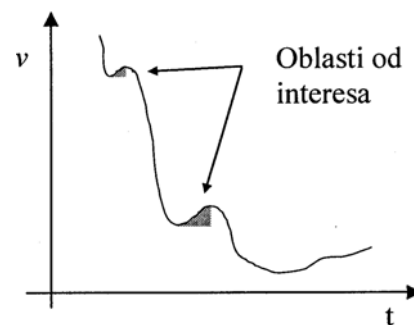
Uopšteno, za vreme svakog udara signal opada, ali pri opadanju postoje periodi u kojima signal privremeno raste, što je prouzrokovano promenom lokalnog polja naprezanja oko optičkog vlakna. Ovi delovi signala ukazuju na oštećenje materijala u kompozitu, a površine ispod ovih delova krive reprezentuju količinu absorbovane energije tokom udara (slika 9). Dobijena vrednost je relativna i karakterizuje ponašanje materijala pri istim eksperimentalnim uslovima.

ZAKLJUČAK

Prikazani rezultati pokazuju da intenzitetni fiberoptički senzori mogu biti korišćeni za merenje oštećenja u laminarnim termoplastičnim kompozitnim materijalima.



Slika 8. Signali na epruveti do kritičnog udara
Figure 8. Signals on the specimen until critical damage



Slika 9. Uveličani deo signala
Figure 9. Enlarged part of the signal

Dobijeni signali zavise od vrste materijala, ali se može specificirati isti niz pravila (relativno različit, zavisno od vrste) za određivanje stepena oštećenja. Merenje signala u realnom vremenu tokom udara i odgovarajuća analiza omogućavaju kvantitativno određivanje stepena oštećenja u materijalu. Postojeće metode u većini slučajeva koriste samo intenzitet signala pre i nakon udara kao meru oštećenja. Ova metodologija omogućava praćenje oštećenja kompozita u realnom vremenu i daje upozorenje pre pojave kritičnog loma.

LITERATURA

- [1] C. Potel, T. Chotard, J. F. Belleval, M. Benzeggagh, Characterization of composite materials by ultrasonic methods: modelization and application to impact damage, *Composites B* **29B** (1998) 159–169
- [2] W. Haselbach, B. Lauke, Acoustic emission of debonding between fibre and matrix to evaluate local adhesion, *Comp. Sci. Teh.* **63** (2003) 2155–2162
- [3] D. Sung, C. Kim, C. Hong, Monitoring of impact damages in composite laminates using wavelet transform, *Composites B* **33** (2002) 35–43
- [4] A. Malki, R. Gafsi, L. Michel, M. Labarrere, P. Lecoy, Impact and vibration detection in composite materials by using intermodal interference in multimode optical fibers, *App. Opt.* **35** (25) (1998) 5198–5201
- [5] I.B. Kwon, C.G. Kim, C.S. Hong, Simultaneous sensing of the strain and points of failure in composite beams with an embedded fiber optic Michelson sensor, *Comp. Sci. Tehn.* **57** (1997) 1639–1651

- [6] Takeda S, Okabe Y, Takeda N. Delamination detection in CFRP laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors, *Composites A*, **33** (2002) 971–980
- [7] Hadžić R, John S, Herszberg I. Structural integrity analysis of embedded optical fibers in composite structures, *Comp. Struct.*, **47** (1999) 759–765
- [8] Seo D.C, Lee J.J. Effect of embedded optical sensors on transverse crack spacing of SMART composite structures, *Composite Structures*, **32** (1995) 51–58
- [9] I. Živković, P. Perišić, Z. Burzić, P. Uskoković and R. Aleksić, Aramid fiber reinforced laminar thermoplastic composite materials, *Proc. 23rd SAMPE Europe Int. Conf.*, Paris, (2002) 249–260.
- [10] I.D. Živković, Toughness of para aramid fiber – poly(vinyl butiral) laminar composite material, MSc Thesis, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, (2002)
- [11] I. Živković, Lj. Brajović, P. Uskoković, R. Aleksić, "Indentation damage detection in thermoplastic composite laminates by using embedded optical fibers" *J. Adv. Mater.*, **37** (2005) 33–37

SUMMARY

DAMAGE DETECTION IN LAMINAR THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS BY MEANS OF EMBEDDED OPTICAL FIBERS

(Scientific paper)

Aleksandar M. Kojović¹, Irena D. Živković², Ljiljana M. Brajović³, Dragan Mitrović¹, Radoslav R. Aleksić¹

¹Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

²Institute of Security, Belgrade

³Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

This paper investigates the possibility of applying optical fibers as sensors for investigating low energy impact damage in laminar thermoplastic composite materials, in real time. Impact toughness testing by a Charpy impact pendulum with different loads was conducted in order to determine the method for comparative measurement of the resulting damage in the material. For that purpose intensity-based optical fibers were built in to specimens of composite materials with Kevlar 129 (the DuPont registered trade-mark for poly(p-phenylene terephthalamide)) woven fabric as reinforcement and thermoplastic PVB (poly(vinyl butyral)) as the matrix. In some specimens part of the layers of Kevlar was replaced with metal mesh (50% or 33% of the layers).

Experimental testing was conducted in order to observe and analyze the response of the material under multiple low-energy impacts. Light from the light-emitting diode (LED) was launched to the embedded optical fiber and was propagated to the phototransistor-based photo detector. During each impact, the signal level, which is proportional to the light intensity in the optical fiber, drops and then slowly recovers. The obtained signals were analyzed to determine the appropriate method for real time damage monitoring. The major part of the damage occurs during impact. The damage reflects as a local, temporary release of strain in the optical fiber and an increase of the signal level.

The obtained results show that intensity-based optical fibers could be used for measuring the damage in laminar thermoplastic composite materials. The acquired optical fiber signals depend on the type of material, but the same set of rules (relatively different, depending on the type of material) could be specified. Using real time measurement of the signal during impact and appropriate analysis enables quantitative evaluation of the impact damage in the material. Existing methods in most cases use just the intensity of the signal before and after the impact, as the measure of damage. This method could be used to monitor the damage in real time, giving warnings before fatal damage occurs.

Key words: Real-time damage monitoring • Laminar thermoplastic composite materials • Fiberoptic sensors •

Ključne reči: Praćenje oštećenja u realnom vremenu • Laminarni termoplastični kompozitni materijali • Fiberoptički senzori •