

IRENA D. ŽIVKOVIĆ<sup>1</sup>  
ALEKSANDAR M. KOJOVIĆ<sup>2</sup>  
MILOŠ C. TOMIĆ<sup>1</sup>  
LJILJANA M. BRAJOVIĆ<sup>3</sup>  
RADOSLAV R. ALEKSIĆ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut bezbednosti,  
Beograd

<sup>2</sup>Tehnološko–metalurški  
fakultet, Beograd

<sup>3</sup>Građevinski fakultet,  
Beograd

NAUČNI RAD

66.017:620.1:681.586.5:623.5:620.19

## UPOTREBA OPTIČKIH VLAKANA ZA DETEKCIJU OŠTEĆENJA KOMPOZITNIH LAMINATA NAMENJENIH ZA BALISTIČKU ZAŠTITU

*Cilj ovoga rada je istraživanje mogućnosti primene optičkih vlakana kao intenzitetnih senzora za detekciju oštećenja balističkih kompozitnih materijala u realnom vremenu. Ispitivane su strukture kompozita ojačane kontinualnim vlaknima. Nastanak oštećenja i lom laminata tokom ispitivanja su registrovani padom inteziteta svetlosnog signala propuštenog kroz optička vlakna. Uzorci termoplastičnih i termoreaktivnih laminata istog ojačanja su nakon ugrađivanja optičkih vlakana izloženi balističkom udaru standardnim oružjem i municijom. Ispitivanja su potvrdila opravdanost upotrebe optičkih vlakana kao senzora za uočavanje prisustva oštećenja laminata, u realnom vremenu.*

Postoje brojni fiberoptički senzori koji se upotrebljavaju u razvoju smart materijala [1,2] a najznačajniji su Bragg–ove rešetke, intenzitetni fiberoptički senzori, polarimetarski fiberoptički senzori i različiti interferometarski fiberoptički senzori bazirani na Fabry–Perot, Mach–Zehnder i Michelson konfiguracijama. I pored njihovih ograničenja ovi senzori su sposobni za merenje specifičnih kvantitativnih veličina kao što su deformacija i temperatura. Poznati su primeri praćenja stanja materijala koji uključuju detekciju udarnog oštećenja [3,4–6] i delaminacije [7], merenje deformacija [8,9], praćenje širenja prsline [10–12], detekciju poprečnih prsline [13,14] i detekciju oštećenja izazvanog zamorom [15,16]. Intenzitetni fiberoptički senzori predstavljaju jednu od prvih i osnovnih grupa optičkih senzora koji se koriste za praćenje stanja materijala [17].

S obzirom da optička vlakna svojim oblikom i strukturom omogućavaju jednostavnu ugradnju i umanjuju mehanička svojstva kompozitnih materijala ona mogu da posluže kao pouzdan, automatski i dugoročan mehanizam za praćenje oštećenja strukture u realnom vremenu. Sa tim ciljem ugrađena su u laminatne kompozitne materijale namenjene za balističku zaštitu. Eksperimentalna ispitivanja su izvedena radi posmatranja "odgovora" kompozitnog materijala na dejstvo balističkog udara kao i analize njegovog ponašanja prilikom više uzastopnih udara.

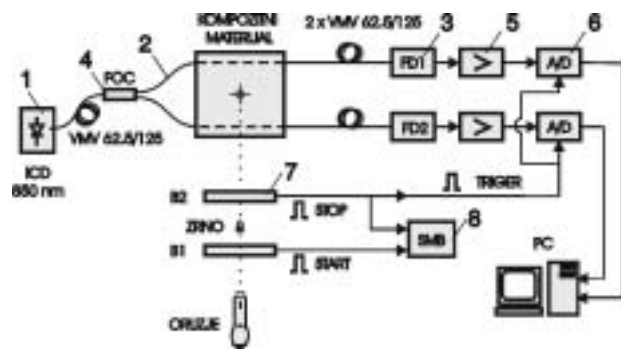
### EKSPERIMENTALNI REZULTATI

#### Kompozit sa ojačanjem u vidu aramidnih vlakana i termoplastičnom matricom

Za ispitivanje ponašanja materijala usled balističkog udara napravljeni su uzorci sa ojačanjem od arami-

dnih vlakana i termoplastičnim poli(vinil butiralom) (PVB) prema definisanom režimu [18]. U svaki uzorak su ugrađena po dva multimodna optička vlakna [19]. Razmak između vlakana je 60 mm.

Uzorci su balistički testirani za nivo IIIa prema standardu NIJ 0101.03 sa pet uzastopnih hitaca.



Slika 1. Shema mernog sistema korišćenog pri balističkom testiranju

Figure 1. Scheme of the monitoring system used during ballistic testing

Merni sistem je prikazan na slici 1. Opto–elektronski deo mernog sistema se sastoji od dve emitterske diode (1) kao izvora svetlosti, u vidljivom ili infracrvenom spektru zračenja, koja se uvodi u multimodna optička vlakna (2), i dva fotodetektora (3) na bazi fototranzistora kojima se meri intenzitet optičkog signala koji se vodi optičkim vlaknom. Broj emitterskih dioda može biti jednak broju vlakana, ali može biti i manji ukoliko se koriste fiberoptičke račve (4). Račve služe za usmeravanje zračenja iz jedne diode u više vlakana. Signal sa fotodiode se pojačava sa transimpedansnim pojačavačem (5) i digitalizuje A/D konvertorom (6). Brzina A/D konverzije mora biti veća od 100 KS/s sa rezolucijom većom od 12 bita. A/D konverzija počinje u trenutku koji je određen signalom iz svetlosne barijere (7) koja se nalazi ispred kompozitnog materijala i detektuje prolazak zrna. Merni sistem sadrži i par svetlosnih barijera (8) koje se koriste

Rad je saopšten na 1<sup>st</sup> SEECChE, Beograd, Septembar 25–28, 2005 ([www.ache.org.yu/seeche1/](http://www.ache.org.yu/seeche1/))

Adresa autora: I.D. Živković, Institut bezbednosti, Kraljice Ane bb, 11000 Beograd

E–mail: [zirena@tmf.bg.ac.yu](mailto:zirena@tmf.bg.ac.yu); [bziv@eunet.yu](mailto:bziv@eunet.yu)

Rad primljen: Novembar 11, 2005

Rad prihvaćen: Januar 20, 2006

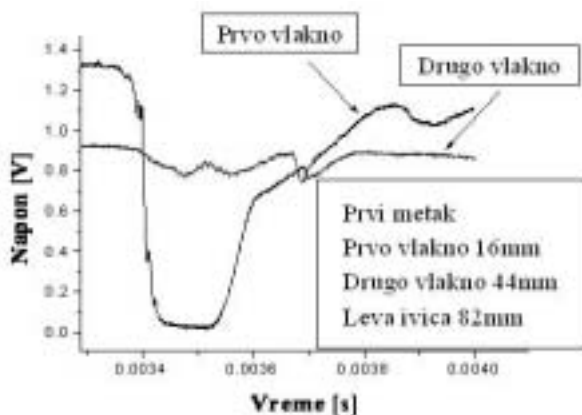
za određivanje brzine zrna. Akvizicioni sistem sadrži dva kanala za simultano uzorkovanje tako da se izlazni signal sa fotodetektora može pratiti za oba vlakna u isto vreme. Fotografija kompozitne ploče sa ugrađenim optičkim vlaknima nakon pet balističkih testova je prikazana na slici 2. Koordinate pogodaka su prikazane u tabeli 1.



Slika 2. Fotografija kompozitne ploče sa ugrađenim optičkim vlaknima nakon pet balističkih testiranja

Figure 2. Photograph of the composite plate with built in optical fibers after five ballistic tests

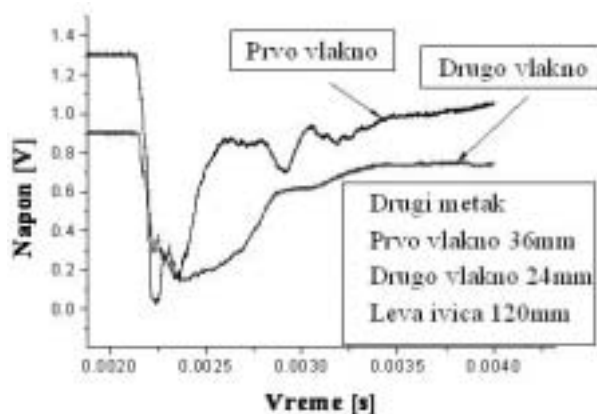
Slike 3–7 prikazuju eksperimentalne rezultate dobijene nakon pet uzastopnih balističkih testiranja.



Slika 3. Zavisnost napona na fotodetektorima od vremena tokom delovanja prvog balističkog udara na kompozitni uzorak  
Figure 3. Dependence of the voltage on the photodetectors on time during the first ballistic loading on the composite sample

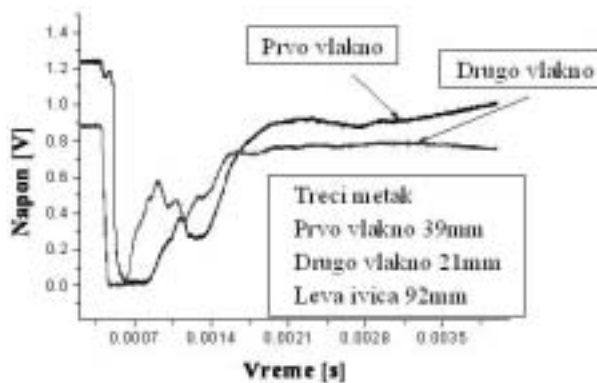
Slika 3 prikazuje pad intenziteta signala tokom prvog balističkog testiranja. Mesto udara je bliže prvom nego drugom vlaknu. Na dijagramu se vidi značajan pad intenziteta signala kroz oba vlakna pri čemu je promena veća kod prvog vlakna. Nakon balističkog testiranja intenzitet signala se skoro vratio na početnu vrednost što ukazuje da vlakna nisu slomljena niti drastično oštećena tokom prvog testiranja.

Slika 4 prikazuje pad intenziteta signala tokom drugog balističkog testiranja. Na dijagramu se vidi značajan pad intenziteta signala kroz oba vlakna pri čemu je promena veća kod prvog vlakna. Nakon balističkog testiranja intenzitet signala se skoro vratio na početnu vrednost što ukazuje da vlakna nisu slomljena niti drastično oštećena tokom drugog testiranja. Slično ponašanje se može uočiti i tokom trećeg i četvrtog testiranja (slike 5 i 6).



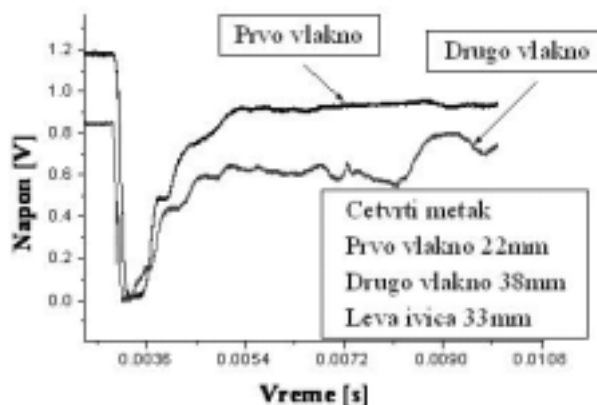
Slika 4. Zavisnost napona na fotodetektorima od vremena tokom delovanja drugog balističkog udara na kompozitni uzorak

Figure 4. Dependence of the voltage on the photodetectors on time during the second ballistic loading on the composite sample



Slika 5. Zavisnost napona na fotodetektorima od vremena tokom delovanja trećeg balističkog udara na kompozitni uzorak

Figure 5. Dependence of the voltage on the photodetectors on time during the third ballistic loading on the composite sample

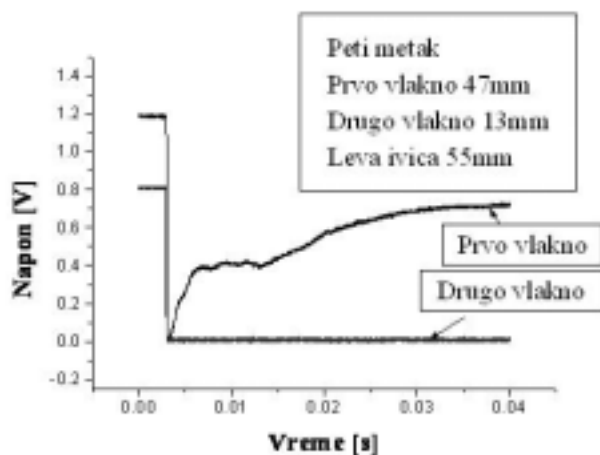


Slika 6. Zavisnost napona na fotodetektorima od vremena tokom delovanja četvrtog balističkog udara na kompozitni uzorak

Figure 6. Dependence of the voltage on the photodetectors on time during the fourth ballistic loading on the composite sample

Tabela 1. Koordinate pogodaka tokom balističkog testa  
Table 1. Coordinates of the hits during the ballistic test

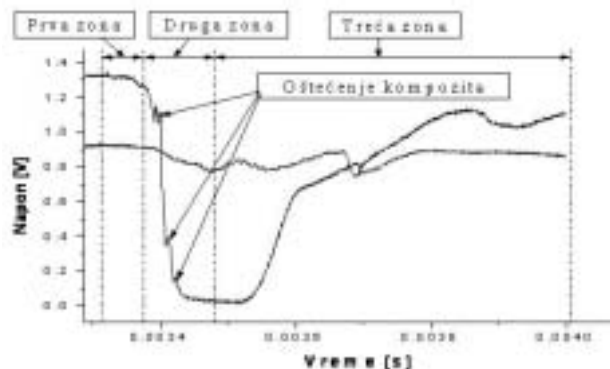
Metak	prvi	drugi	treći	četvrti	peti
Rastojanje od gornjeg vlakna, mm	16	36	39	22	47
Rastojanje od donjeg vlakna, mm	44	24	21	38	13
Rastojanje od leve ivice, mm	82	120	92	33	55



Slika 7. Zavisnost napona na fotodetektorima od vremena tokom delovanja petog balističkog udara na kompozitni uzorak  
Figure 7. Dependence of the volume on the photodetectors on time during the fifth ballistic loading on the composite sample

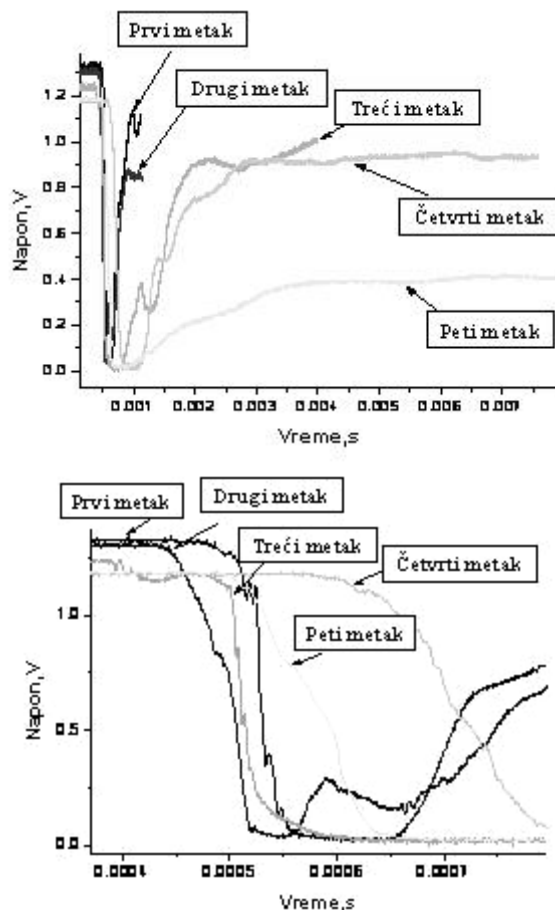
Slika 7 predstavlja pad intenziteta optičkog signala tokom petog balističkog testiranja. Dijagram prikazuje značajan pad intenziteta optičkog signala kroz oba vlakna. Nakon testiranja intenziteti signala pokazuju značajna odstupanja od početne vrednosti, tj. prvo vlakno je značajno deformisano a drugo trajno oštećeno tokom testiranja.

Svi dijagrami pokazuju slično ponašanje intenziteta optičkog signala. Činjenica je da se svi mogu podeliti na tri zone kako je prikazano na slici 8. Prva zona je zona probijanja prvog sloja kompozitnog materijala. Ona počinje kada projektil dotakne kompozitnu ploču i traje sve dok ne dođe do popuštanja prvog sloja materijala. Druga zona je zona prolaska projektila kroz kompozitni materijal do njegovog konačnog zaustavljanja i treća zona je zona relaksacije. Dijagrami, takođe, pokazuju da maksimalni pad intenziteta optičkog signala može dostići i nultu vrednost, što znači da nema transmisije svetlosti kroz vlakno u trenutku kada naprezanje oko optičkog vlakna dostigne maksimum. Slabljenje intenziteta optičkog signala tokom balističkog udara se događa usled uticaja primenjenog dinamičkog naprezanja koje uzrokuje napone u materijalu oko ugrađenog optičkog vlakna. Naponi u materijalu uzrokuju mikrosavijanje optičkog vlakna, menjaju oblik njegovog poprečnog preseka i indekse refrakcije jezgra i omotača. Intenzitet si-



Slika 8. Zona odgovora materijala tokom balističkog udara  
Figure 8. Zone of material response during ballistic loading

gnala dostiže nultu vrednost kada indeks refrakcije omotača dostiže vrednost indeksa prelamanja jezgra i tako se gube uslovi pod kojima postoji totalna refleksija na graničnoj površini jezgro-omotač. Na slici 9 dat je uporedni dijagram pada intenziteta signala u prvom vlaknu tokom svih pet balističkih udara.



Slika 9. Uporedni dijagram pada intenziteta signala u prvom vlaknu tokom svih pet balističkih udara. Levo – ceo interval merenja; desno – uvećano

Figure 9. Comparative diagram of the decrease of the signal intensity in the first fiber during all five ballistic loadings. Left – total measurement interval, right – magnified.

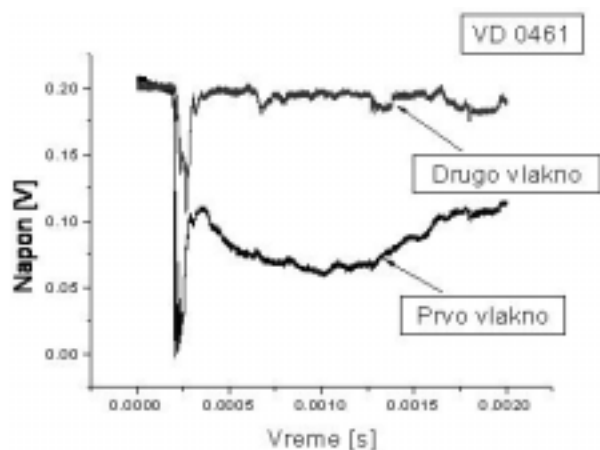
Tabela 2. Opis uzoraka sa termoreaktivnom matricom  
Table 2. Description of the samples with a thermosetting matrix

Oznaka	VD 0461
Ojačanje	Aramidna tkanina
Vrsta tkanja	Ravansko
Matrica	Fenolna smola
Površinska masa uzorka, kg/m <sup>2</sup>	9,90
Debljina uzorka, mm	6,87
Debljina sloja, mm	0,36
Površinska masa sloja, kg/m <sup>2</sup>	0,52
Broj slojeva ojačanja	19

### Kompoziti sa termoreaktivnom matricom

Ispitivani uzorci su dobijeni od firme "Ten cate advanced composite materials", nose oznake VD 0461 i namenjeni su za zaštitu pilotskih kabina za nivo IIIa prema standardu NIJ 0101.04. Optička vlakna su ugrađivana na isti način kao kod kompozita sa termoplastičnom matricom [19].

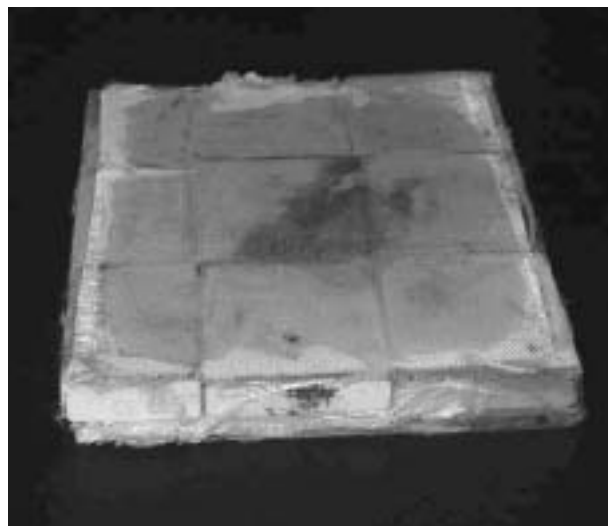
Merni sistem je isti kao i u prethodnom slučaju (slika 1). Detaljniji opis uzorka VD 0461 je dat u tabeli 2. Dobijeni rezultati tokom balističkih udara su prikazani na slici 10. Slika 10 prikazuje pad intenziteta optičkog signala tokom balističkog udara u uzorak VD 0461. Nakon završetka udara signal se nije u potpunosti vratio na početnu vrednost ali joj se aproksimativno približio.



Slika 10. Zavisnost napona na fotodetektorima od vremena tokom opterećivanja uzorka VD 0461  
Figure 10. Dependence of the voltage on the photodetectors on time during the loading of sample VD 0461

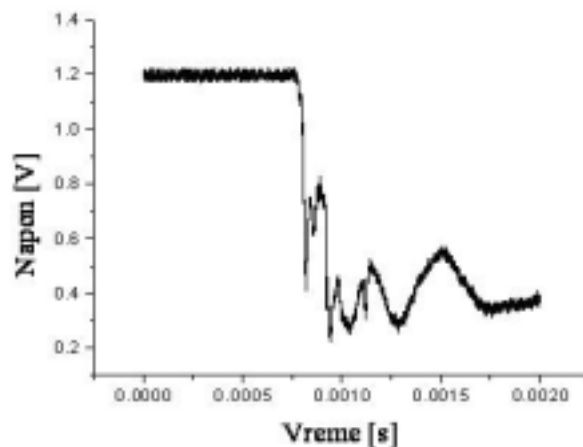
### Kompozit sa termoplastičnom matricom i keramičkim pločicama

Uzorak je napravljen sa aramidnom tkaninom kao ojačanjem, poli(vinil butiralom) kao matricom i keramičkim pločicama kao prednjim frontom (slika 11). U poslednji sloj uzorka su ugrađena optička vlakna i balističko



Slika 11. Fotografija kompozitnog uzorka sa keramičkim pločicama  
Figure 11. Photograph of the composite with ceramic plates

testiranje je izvedeno kao i u prethodnim slučajevima. Testiranje je izvedeno za nivo III prema standardu NIJ 0101.03. Dijagram na slici 12 prikazuje pad intenziteta optičkog signala tokom balističkog udara u termoplastični kompozitni uzorak sa keramičkim pločicama kao prednjim frontom. Nakon testiranja signal se nije u potpunosti vratio na početnu vrednost ali joj se aproksimativno približio.



Slika 12. Zavisnost napona na fotodetektoru od vremena tokom delovanja balističkog udara na uzorak sa keramičkim pločicama  
Figure 12. Dependence of the voltage on the photodetectors on time during the ballistic loading of the sample with ceramic plates

### Usporedni pregled ponašanja optičkog signala tokom balističkog udara

Mogu se uočiti različiti oblici krive intenziteta optičkog signala u zavisnosti od vrste materijala. Oblik krive zavisnosti pada intenziteta optičkog signala od vremena

se menja u zavisnosti od načina raspodele napona kroz materijal, odnosno od odgovora materijala na primenjeno opterećenje. Različite matrice različito prenose napone kroz slojeve, a samim tim dolazi i do različitih mehanizama oštećenja što se i registrovalo optičkim vlaknima, kako je prikazano na slikama 3–6 i 10. Slika 12 prikazuje pad intenziteta optičkog signala od vremena kroz kompozit sa keramičkim pločicama kao prednjim frontom. Polimerni kompozit apsorbira energiju svojom žilavošću dok keramika apsorbira tvrdoćom, te se poredeći slike 3–6 i 12 ova razlika može i primetiti.

## ZAKLJUČAK

Za ispitivanje balističkim udarom napravljeni su laminarni kompozitni materijali sa ojačanjem u vidu aramidne tkanine i termoplastičnim PVB–om kao matricom, sa ojačanjem u vidu aramidnih vlakana i fenolom kao matricom i sa ojačanjem u vidu aramidne tkanine i termoplastičnim PVB–om kao matricom i keramičkim pločicama kao prednjim frontom.

Po dva paralelno postavljena optička vlakna su ugrađena u svaki kompozit i materijali su balistički testirani standardnim oružjem i municijom. Rezultati su pokazali pad intenziteta optičkog signala kroz sva ugrađena optička vlakna pri primenjenom udaru. Svi dobijeni dijagrami pokazuju slično ponašanje i mogu se podeliti na tri zone: zonu probijanja prvog sloja kompozitnog materijala, zonu prolaska projektila kroz kompozitni materijal do njegovog konačnog zaustavljanja i zonu relaksacije. Dijagrami takođe pokazuju da maksimalni pad intenziteta signala dostiže nultu vrednost, što znači da vlakna ne provode svetlost u intervalu u kom polje lokalnog napona dostiže dovoljno veliku vrednost koja izaziva deformaciju optičkih vlakana do te mere da se karakteristike samih senzora značajno menjaju. Slabljenje intenziteta optičkog signala tokom udara je uzrokovano uticajem primenjenog dinamičkog naprezanja koje uzrokuje napone oko ugrađenih optičkih vlakana. Napon u materijalu uzrokuje mikrosavijanje optičkog vlakna, menja oblik njegovog poprečnog preseka i menja indekse refrakcije jezgra i omotača. Intenzitet signala dostiže nultu vrednost kada indeks refrakcije omotača dostiže vrednost indeksa prelamanja jezgra i tako se gube uslovi pod kojima postoji totalna refleksija na graničnoj površini jezgro–omotač.

Takođe, može se zaključiti da za različite materijale krive zavisnosti pada intenziteta signala od vremena imaju drugačije oblike, odnosno, može se reći da senzori "prepoznaju" materijal jer sam oblik krive zavisi od vrste materijala.

Rezultati eksperimenta pokazuju da se optička vlakna mogu primeniti kao senzori za praćenje stanja laminata tokom balističkog udara.

## LITERATURA

- [1] K.T.V. Grattan and B.T. Meggitt (eds), *Devices and Technology, Optical fiber sensor technology 2*, Chapman and Hall (1998).
- [2] A.D. Kersey, A review of recent developments in fiber optic sensor technology, *Opt. Fiber Technol.: Mater., Devices Syst.* **2** (1996) 291–317.
- [3] M. LeBlanc and R.M. Measures, Impact damage assessment in composite materials with embedded fiber–optic sensors, *Composites Engineering* **2** (1992) 573–596.
- [4] R.M. Measures, N.D.W. Glossop, J. Lymer, M. LeBlanc, S. Dubois, W. Tsaw and R.C. Tennyson, Structurally integrated fiber optic damage assessment system for composite materials, *Appl. Opt.* **28** (1989) 2626–2633.
- [5] A.R. Martin, G.F. Fernando and K.F. Hale, Impact damage detection in filament wound tubes using embedded optical fiber sensors, *Smart Mater. Struct.* **6** (1997) 470–476.
- [6] C.C. Chang and J.S. Sirkis, Design of fiber optic sensor systems for low velocity impact detection, *Smart Mater. Struct.* **7** (1998) 166–177.
- [7] N. Elvin and C. Leung, Feasibility study of delamination detection with embedded optical fibers, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **8** (1997) 824–828.
- [8] W.J. Rowe, E.O. Rausch and P.D. Dean, Embedded optical fiber strain sensor for composite structure applications, *SPIE* **718** (1986) 266–273.
- [9] L. Everall, A. Gallon and D. Roberts, Optical fiber strain sensing for practical structural load monitoring, *Sensor Review* **20** (2000) 113–119.
- [10] I. McKenzie, R. Jones, I.H. Marshall and S. Galea, Optical fiber sensors for health–monitoring of bonded repair systems, *Compos. Struct.* **50** (2000) 405–416.
- [11] W.K. Chiu, Y.L. Koh, S.C. Galea and N. Rajic, Smart structure application in bonded repairs, *Compos. Struct.* **50** (2000) 433–444.
- [12] F. Findik, N. Mrad, and A. Johnston, Strain monitoring in composite patched structures, *Compos. Struct.* **49** (2000) 331–338.
- [13] Y. Okabe, S. Yashiro, T. Kosaka and N. Takeda, Detection of transverse cracks in CFRP composites using embedded fiber Bragg grating sensors, *Smart Mater. Struct.* **9** (2000) 832–838.
- [14] N. Takeda, T. Kosaka and T. Ichiyama, Detection of transverse cracks by embedded plastic optical fiber in FRP laminates, *SPIE* **3670** (1999) 248–255.
- [15] R.A. Badcock and G.F. Fernando, An intensity–based optical fiber sensor for fatigue damage detection in advanced fiber–reinforced composites, *Smart Mater. Struct.* **4** (1995) 223–230.
- [16] D.C. Lee, J.J. Lee, I.B. Kwon and D.C. Seo, Monitoring of fatigue damage of composite structures by using embedded intensity–based optical fiber sensors, *Smart Mater. Struct.* **10** (2001) 285–292.
- [17] K.F. Hale, B.S. Hockenhull and G. Christodoulou, The application of optical fibers as witness devices for the detection of plastic strain and cracking, *Strain* **16** (1980) 150–154.
- [18] I.D. Živković, P.I. Perisić, Z.H. Burzić, S.S. Putić, R.R. Aleksić, "Aramid fiber reinforced laminar thermoplastic composite materials", *Proc. 23rd SAMPE Europe Int. Conf., Pariz*, (2002), 249–260.

- [19] I. Živković, Lj. Brajović, P. Uskoković, R. Aleksić, "Indentation damage detection in thermoplastic composite laminates by using embedded optical fibers" *Journal of Advanced Materials*, 37, 1 (2005) 33–37

## SUMMARY

### THE USAGE OF OPTICAL FIBERS FOR DAMAGE DETECTION IN BALLISTIC PROTECTION COMPOSITE LAMINATES

(Scientific paper)

Irena D. Živković<sup>1</sup>, Aleksandar M. Kojović<sup>2</sup>, Miloš C. Tomić<sup>1</sup>, Ljiljana M. Brajović<sup>3</sup>, Radoslav R. Aleksić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Security, Kraljice Ane bb, Belgrade, Serbia and Montenegro

<sup>2</sup>Faculty of Technology and Metallurgy, Karnegijeva 4, Belgrade, Serbia and Montenegro

<sup>3</sup>Faculty of Civil Engineering, Bul Kralja Aleksandra 73, Belgrade, Serbia and Montenegro

This paper describes the procedure of embedding fiberoptic sensors in laminar thermoplastic composite material, as well as damage investigation after ballistic loading. Thermoplastic-reinforced composite materials were made for increased material damage resistance during ballistic loading. Damage inside the composite material was detected by observing the intensity drop of the light signal transmitted through the optical fibers. Experimental testing was carried out in order to observe and analyze the response of the material under various load conditions. Different types of Kevlar<sup>®</sup> reinforced composite materials (thermoplastic, thermoreactive and thermoplastic with ceramic plate as the impact face) were made. Material damage resistance during ballistic loading was investigated and compared. Specimens were tested under multiple load conditions.

The opto-electronic part of the measurement system consists of two light-emitting diodes as light sources for the optical fibers, and two photodetectors for the light intensity measurement. The output signal was acquired from photo detectors by means of a data acquisition board and personal computer. The measurements showed an intensity drop of the transmitted light signal as a result of the applied loading on composite structure for all the optical fibers. All the diagrams show similar behavior of the light signal intensity. In fact, all of them may be divided into three zones: the zone of penetration of the first composite layer, the bullet traveling zone through the composite material till its final stop, and the material relaxation zone. The attenuation of the light signal intensity during impact is caused by the influence of the applied dynamic stress on the embedded optical fibers. The applied stress caused microbending of the optical fiber, changes in the shape of the cross-section and the unequal changes of the indices of refraction of the core and cladding due to the stress-optic effect. The main goal of the experiment was to develop a system for thermoplastic composite structure health monitoring during real life exploitation.

The results of the experiments confirmed that optical fibers could be applied as intensity sensors in the real-time monitoring of structural changes in thermoplastic laminar composite materials under ballistic loading. The light signal intensity drops in an optical fiber in response to the applied loading on the composite material.

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

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