

UGRADNJA OPTIČKIH VLAKANA KAO SENZORA U SLOJEVITE TERMOPLASTIČNE KOMPOZITNE MATERIJALE

Irena ŽIVKOVIĆ, Ljiljana BRAJOVIĆ*, Petar USKOKOVIĆ, Stevan MILINKOVIĆ, Radoslav ALEKSIĆ**
Institut bezbednosti, Kraljice Ane bb, 11000 Beograd
*Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra, 11000 Beograd
**Tehnološko-metalurški fakultet, Karnegijeva 4, 11000 Beograd

(Primljen 30. maja 2003., prihvaćen 25. juna 2003.)

Sadržaj – Optička vlakna se poslednjih godina sve više koriste kao osnova senzora i senzorskih sistema u metodama praćenja oštećenja strukture kompozitnih materijala u realnom vremenu. Prednosti senzora na bazi optičkih vlakana, tj. fiberoptičkih senzora (FOS) u odnosu na konvencionalne senzorske metode su dobro poznate, npr. otpornost na koroziju i zamor, fleksibilnost i mala težina, imunitet na elektromagnetno okruženje i širok opseg odziva. Ove osobine omogućavaju ne samo mogućnost ugradnje u kompozitne strukture već i njihovu pristupačnost lokacijama gde su se ostale senzorske metode pokazale nezadovoljavajućim. Postoje različite konfiguracije FOS-a u zavisnosti od vrste optičkih vlakana koja se koriste kao i u zavisnosti od svetlosne veličine koja se menja tokom merenja. Intenzitetni FOS se zasnivaju na promeni intenziteta svetlosti koja se vodi optičkim vlaknima od svetlosnog izvora prema mernom mestu i od mernog mesta prema foto-detektoru sa promenom merene veličine. Promena intenziteta može nastati ili usled nekog efekta u samom vlaknu kao što je naprezanje, oštećenje, savijanje, mikrosavijanje, promena indeksa prelamanja omotača, ili usled apsorpcije, refleksije, prelamanja svetlosti i sl. van optičkog vlakna. Ovaj rad pruža procenu opravdanosti praćenja oštećenja uzrokovano utiskivanjem, unutar slojevitog kompozita u realnom vremenu, upotrebom sistema ugrađenih FOS intenzitetnog tipa. Prednost ovakvog senzorskog sistema je jednostavan dizajn i niska cena izrade. Za eksperimentalne potrebe napravljeni su termoplastični slojeviti kompozitni materijali sa ugrađenim optičkim vlaknima. Ispitivane su tri konfiguracije kontinualnim vlaknima ojačanih kompozita, aramidno vlakno/poli(vinil-butiral), stakleno vlakno/poli(vinil-butiral) i čelična žica/ poli(vinil-butiral). Indikacija oštećenja i lom laminata tokom ispitivanja je detektovan padom intenziteta svetlosnog signala propuštenog kroz optička vlakna.

Cljučne reči: termoplastični laminati, senzori od optičkih vlakana, detekcija oštećenja usled utiskivanja, praćenje oštećenja strukture u realnom vremenu.

Embeding of Optical Fibers as Sensors in Thermoplastic Composite Laminates

Abstract – Application of optical fibers as sensors for the purpose of in-service health monitoring in composite materials have increased in last few years. Advantages of optical fiber sensors over conventional sensing methods are well-known and include resistance to corrosion and fatigue, similarity of their material properties to the reinforcing fibers, small, flexible and lightweight nature, immunity to electromagnetic interference and high response bandwidth. These features enable their embedding into composite structures and access locations where other sensing methods cannot easily probe. This paper evaluates the feasibility of real-time monitoring of indentation damage in composite laminates from indentation loading using the embedded intensity-based optical fiber sensors. An optical fiber sensing system, which relies solely on monitoring light intensity for providing indication of the composite structural health, offers simplicity in design and cost-effectiveness. For this, aramide/polyvinilbutyral (PVB) laminates with embedded optical fibers were fabricated. Three configurations of woven composites were tested, namely, aramide/PVB, glass fiber/PVB and metal/PVB. Several stacking sequences of aramide and metallic woven layers were used for investigations. Initiation of damage and fracture during testing was detected by observation of the intensity drop of light signal transmitted through optical fiber.

Key words: thermoplastic laminates, optical fiber sensors, indentation damage detection, real-time health monitoring.

1. Uvod

Jedna od bitnih karakteristika termoplastičnih kompozitnih materijala koja doprinosi značajnoj materijalnoj uštedi je mogućnost opremanja kompozita

senzorima od optičkih vlakana koji mogu precizno da procene stanje strukture kompozita. Korišćenje intenzitetnih FOS u kompozitnim strukturama

omogućava detekciju deformacija i oštećenja u realnom vremenu. S obzirom da optička vlakna svojim oblikom i strukturom omogućavaju jednostavnu ugradnju i ne remete mehaničke karakteristike kompozitnih materijala ona mogu da posluže kao pouzdan, automatski i dugoročan mehanizam za praćenje oštećenja strukture [1-12].

Sa ciljem povećanja otpornosti materijala na oštećenje napravljeni su slojeviti kontinualnim vlaknima ojačani kompozitni materijali sa termoplastičnom smolom (poli(vinil-butiralom)) kao matricom [12-18]. Kao ojačanje korišćena su tri tipa vlakana: polimerno (aramid), metalno (žica) i stakleno, sva tri u vidu tkanih formi. U okviru ovog rada razvijen je tehnološki postupak izrade slojevitih termoplastičnih kompozitnih materijala kao i postupak ugradnje optičkih vlakana u kompozitne materijale. Detekcija oštećenja kompozitnih materijala usled delovanja statičkim opterećenjem je vršena metodom praćenja intenziteta svetlosnog signala duž optičkog vlakna.

Eksperimentalna ispitivanja su izvedena radi posmatranja odgovora pomenutog kompozitnog materijala na dejstvo statičkog opterećenja kao i analize njegovog ponašanja prilikom više uzastopnih opterećenja. Takođe je vršeno i poređenje kvantitativno-kvalitativne izdržljivosti kompozitnih materijala na statičko opterećenje za sva tri tipa korišćenog ojačanja.

2. Materijal

2.1. Prikaz svojstava ojačanja

Kao ojačanje korišćena su aramidna i staklena vlakna u vidu tkanine i čelična žica u vidu mrežice. Svojstva ojačavajućih tkanina i mrežice su data u tabelama 1, 2 i 3.

Tabela 1. Svojstva aramidne tkanine.

Vrsta aramidnog vlakna	Kevlar 129
Širina, cm	160
Prepletaj	platno 1/1
Površinska masa, g/m ²	280
Prekidna sila, N/5cm	
-osnova	182,4
-potka	252,6
Prekidno izduženje, %	
-osnova	9,0

-potka	7,5
--------	-----

Tabela 2. Svojstva staklene tkanine.

Vrsta stakla	"E"
Naziv	ROVING R 2117
Prečnik vlakna, μm	13,7
Teks vlakna, g/km	152
Razdvajanje snopa vlakna	1
Teks rovinga, g/km	150
Broj snopova	1
Težina kalema, kg	15÷25

Tabela 3. Svojstva metalne mrežice.

Meš	250
Prečnik, mm	0,040
Stepen prožetosti, %	38
Dimenzije otvora, μm	63
Težina, kg/m ²	0,20
Oznaka čelika	Nerdajući čelik AISI 304/316

2.2. Prikaz svojstava matrice

Kao matrica korišćena je termoplastična folija poli(vinil butirala). Svojstva polimerne matrice data su u tabeli 4.

Tabela 4. Svojstva termoplastične matrice.

Specifična težina	1,058
Indeks refrakcije	1,48
Zatezna čvrstoća, MPa	23
Izduženje, %	210
Modul elastičnosti, MPa	5
Poasonov odnos	± 0,5
Tvrdoća, Shore "A"	64
Specifična toplota, J/kgK	2100
Temperatura staklastog prelaza, °C	16
Toplotna provodljivost, W/mK	0,21
Dielektrična konstanta na 1kHz	4
Faktor disipacije na 1kHz	1,8 10 ⁻⁴

2.3. Prikaz svojstava optičkog vlakna

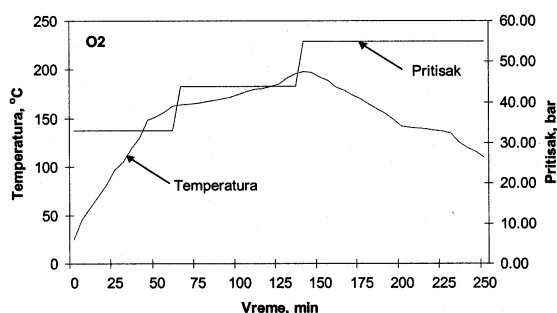
Kao senzori korišćena su multimodna optička vlakna čija su svojstva data u tabeli 5.

Tabela 5. Svojstva optičkog vlakna.

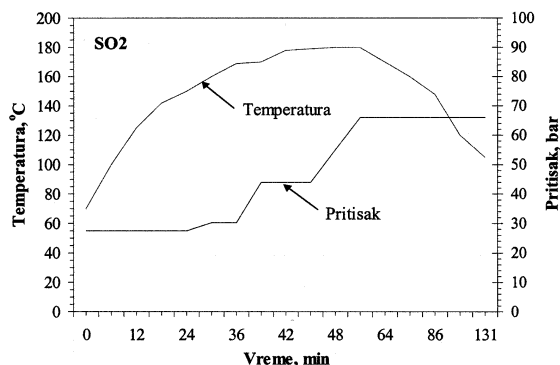
Opseg radnih talasnih dužina, nm	850 – 1300
Slabljenje signala, dB/km	2.87 – 3.66
Propusni opseg MHz/ km	522 – 748
NA	0.27
Prečnici jezgra, omotača i primarne zaštite, μm	62.5 / 125 / 250
Omotač	A
Oznaka vlakna	H2E103EB

3. Opis procesa oblikovanja

Izabrani materijali su kombinovani ravnomernim slaganjem 25 slojeva ojačanja i 24 sloja matrice a dobijeni sendviči su označeni kao: O2 za kompozit sa ojačanjem u vidu aramidne tkanine, SO2 za kompozit sa ojačanjem u vidu staklene tkanine i MO1 za kompozit sa ojačanjem u vidu metalne mrežice.

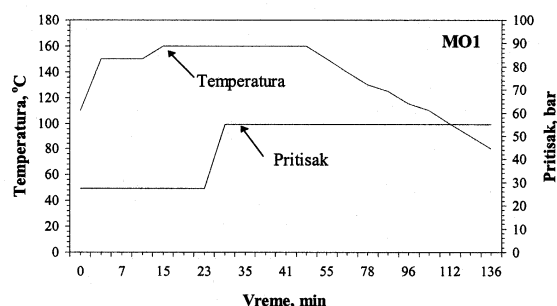


Slika 1. Optimalni režim toplog presovanja laminarnog kompozitnog materijala ojačanog aramidnim vlaknima, uzorak O2.



Slika 2. Optimalni režim toplog presovanja laminarnog kompozitnog materijala ojačanog staklenim vlaknima, uzorak SO2.

Sendviči su zatim podvrgnuti toplom presovanju u zatvorenom kalupu koji je obložen silikonskim uljem. Dobijeni uzorci su hlađeni u kalupu pod opterećenjem, do temperature od 100°C nakon čega su vađeni iz kalupa i ponovo podvrgavani opterećenju sve do potpunog hlađenja. Presovanje je vršeno opti-mizacijom tri parametra: temperature, pritiska i vremena. Na kraju je izmerena konačna masa uzorka i izračunat udeo pojedinih komponentata u uzorku što je prikazano u tabeli 6. Uslovi optimalnog presovanja su prikazani na slikama 1, 2 i 3.



Slika 3. Optimalni režim toplog presovanja laminarnog kompozitnog materijala ojačanog čeličnom žicom, uzorak MO1.

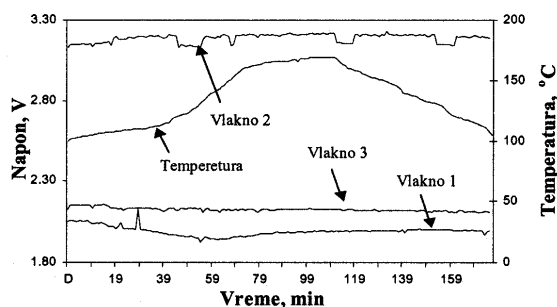
Tabela 6. Konačne mase uzoraka i udeli pojedinačnih komponenti.

Uzorak	Vrsta ojačanja	Masa ojačanja, g	Konačna masa uzorka, g	Udeo ojačanja	Udeo matrice
O2	Aramidno vlakno	145,6	213,9	69,8	30,2
SO2	Stakleno vlakno	229,0	302,3	75,8	24,2
MO1	Čelična žica	108,2	224,7	41,15	51,85

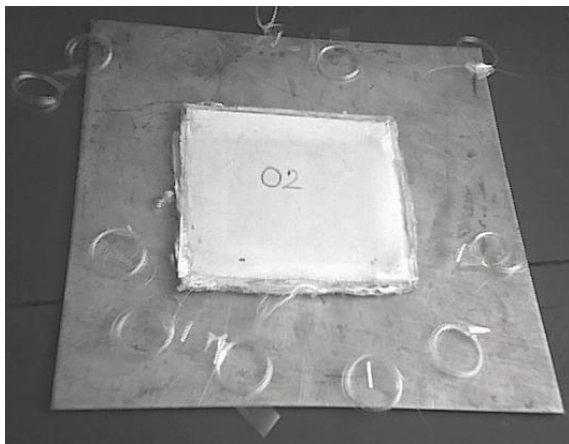
4. Opis procesa ugradnje optičkih vlakana

U dobijene laminarne kompozite naknadno su ugrađena po tri optička vlakna. Vlakna su postavljena paralelno na uzorke a preko njih je postavljen još po jedan sloj matrice i ojačanja. Uzorci su ponovo izlagani temperaturi i pritisku uz praćenje promene optičkog signala koji se vodi optičkim vlaknima u

realnom vremenu. Dijagram promene optičkog signala u vlaknima tokom njihove ugradnje u kompozitni materijal je prikazan na slici 4. Ova slika pokazuje da tokom procesa ugradnje optičkih vlakana u kompozitni materijal nije došlo do trajnog pada optičkog signala, što ukazuje da na njima nema značajnih napreznja i oštećenja nakon završetka procesa ugradnje. Fotografija kompozitne ploče O2 nakon ugradnje optičkih vlakana je prikazana na slici 5.



Slika 4. Promena inteziteta svetlosnog signala kroz optička vlakna tokom njihove ugradnje u kompozitni materijal.



Slika 5. Fotografija kompozitne ploče sa ugrađenim optičkim vlaknima.

5. Eksperimentalni rezultati ispitivanja uticaja statičkog opterećenja na kompozitni materijal pomoću ugrađenih optičkih senzora

Napravljeni uzorci termoplastičnih slojevitih kompozitnih materijala su nakon ugrađivanja optičkih vlakana izloženi statičkom opterećenju. Opterećenje je vršeno utiskivanjem na adaptiranoj kidalici. Uzorci su ispitivani u dva slučaja. Prvi slučaj je kada se opterećenje nanosi na sloj ispod koga su postavljena optička vlakna – gornja strana, a drugi kada se optička vlakna nalaze u poslednjem sloju u odnosu na delovanje opterećenja – donja strana.

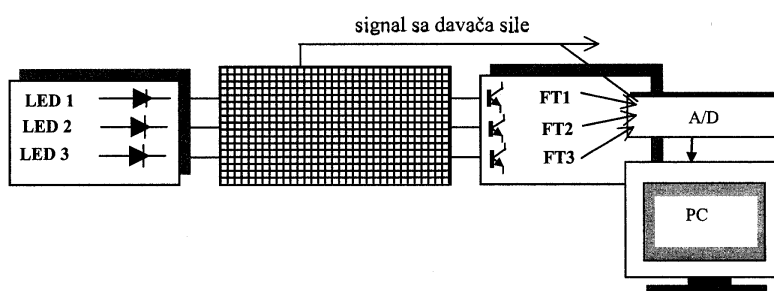
Optoelektronski deo mernog sistema predstavljen na slici 6, se sastoji od emiserskih dioda koje se koriste kao izvori svetlosti koja se uvodi u optička vlakna i fotodetektora na bazi fototranzistora kojima se meri intenzitet optičkog signala koji se vodi optičkim vlaknom.

Akvizicija izlaznih signala sa fotodetektora vrši se pomoću AD kartice i personalnog računara korišćenjem posebno razvijenog programa u Paskalu koji omogućava istovremeno merenje na 16 kanala i promenu vremena uzorkovanja u zavisnosti od vrste merenja. Za ova merenja vreme uzorkovanja je bilo između 30 i 60 s. Na taj način je praćena promena izlaznog signala sa fotodetektora za sve uzorke. Pri ispitivanju uzoraka SO2 i MO1 vršena je istovremeno akvizicija izlaznog signala sa pretvarača za merenje nanetog opterećenja.

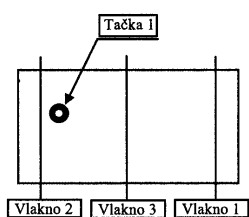
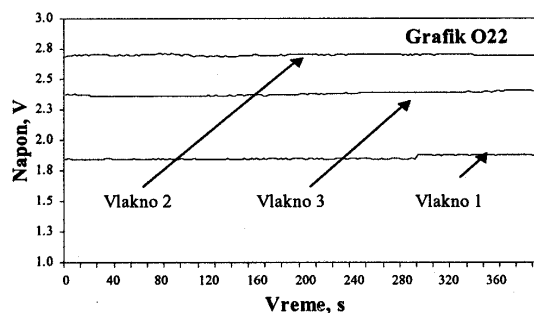
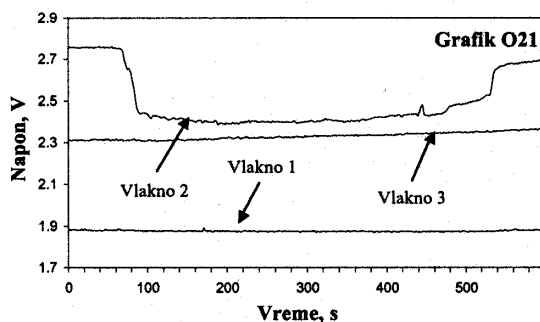
5.1. Uzorak O2

- Ispitivanje tačaka na gornjoj strani -

Tačka 1 nalazi se između vlakana 2 i 3, bliže vlaknu 2. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1860 kp prikazani su na grafiku O21 datom na slici 7.



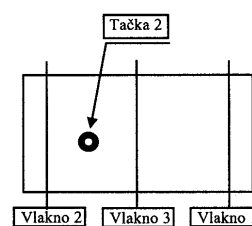
Slika 6. Optoelektronski deo mernog sistema.



Slika 7. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 1 uzorka O2.

Ovaj grafik pokazuje primetan pad signala kroz vlakno 2. Nakon rasterećenja materijala intenzitet signala se vratio na početnu vrednost što ukazuje da vlakna nisu oštećena tokom ispitivanja.

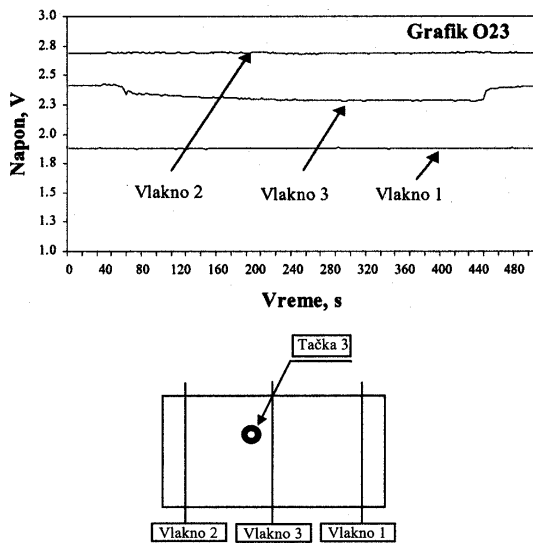
Tačka 2 nalazi se tačno između vlakana 2 i 3. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1800 kp prikazani su na grafiku O22 datom na slici 8.



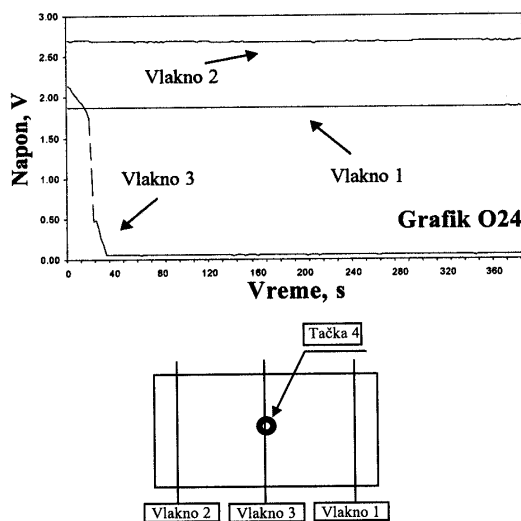
Slika 8. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 2 uzorka O2.

Na ovoj slici se vidi da ne dolazi do pada intenziteta signala kroz optička vlakna što ukazuje da vlakna nisu reagovala na delovanje sile kojom je vršeno opterećenje, tj. da su daleko postavljena u odnosu na mesto delovanja opterećenja.

Tačka 3 nalazi se između vlakana 2 i 3, bliže vlaknu 3. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1800 kp prikazani su na grafiku O23 datom na slici 9.



Slika 9. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 3 uzorka O2.



Slika 10. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 4 uzorka O2.

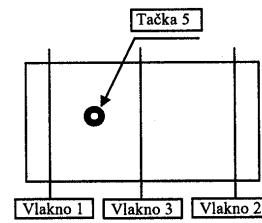
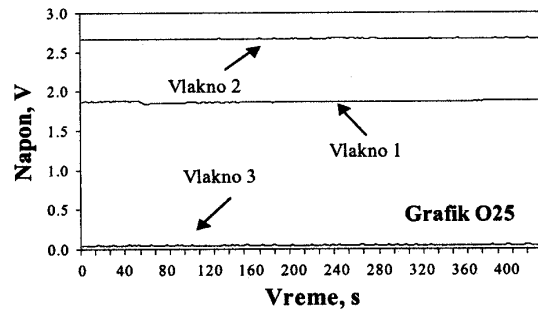
Na ovom grafiku se primećuje blag pad signala kroz vlakno 3. Nakon rasterećenja materijala intenzitet signala se vratio na početni nivo.

Tačka 4 nalazi se tačno iznad vlakna 3. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1800kp prikazani su na grafiku O24 datom na slici 10.

Ovaj grafik pokazuje trajan pad signala kroz vlakno 3 što ukazuje na lom ovog vlakna.

- Ispitivanje tačaka na donjoj strani -

Tačka 5 nalazi se između vlakana 1 i 3. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1800kp prikazani su na grafiku O25 datom na slici 11.

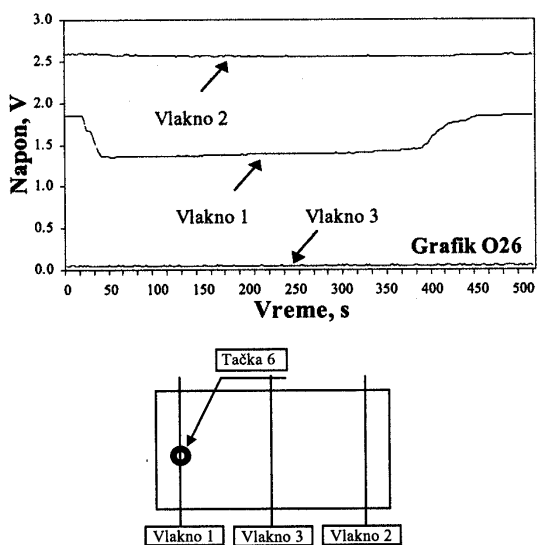


Slika 11. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 5 uzorka O2.

Na ovoj slici se vidi da ne dolazi do pada intenziteta signala kroz optička vlakna što ukazuje da vlakna nisu reagovala na delovanje sile kojom je vršeno opterećenje.

Tačka 6 nalazi se iznad vlakna 1. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1800 kp prikazani su na grafiku O26 datom na slici 12.

Ova slika pokazuje pad intenziteta signala kroz vlakno 1. Nakon rasterećenja materijala signal se vratio na početni nivo.

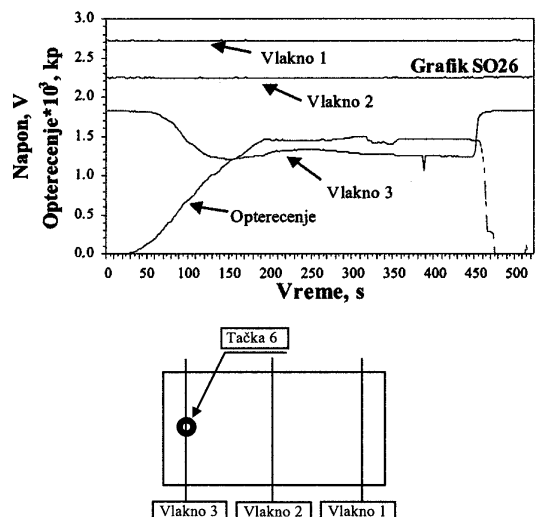


Slika 12. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 6 uzorka O2.

5.2. Uzorak SO2

- Ispitivanje tačaka na donjoj strani -

Tačka 6 nalazi se iznad vlakna 3. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1628kp prikazani su na grafiku SO26 datom na slici 13.

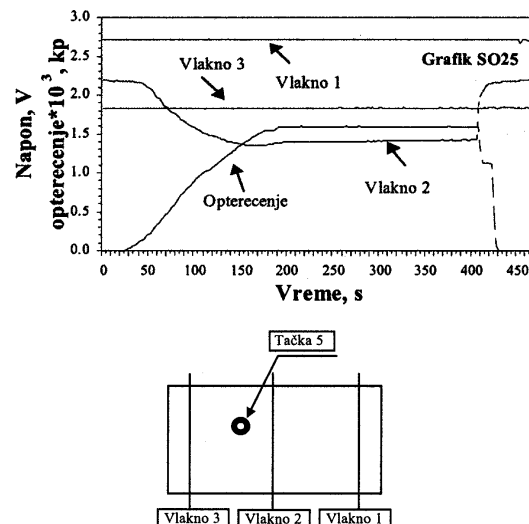


Slika 13. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 6 uzorka SO2.

Na ovoj slici se vidi da dolazi do pada intenziteta signala kroz vlakno 3. Nakon rasterećenja materijala

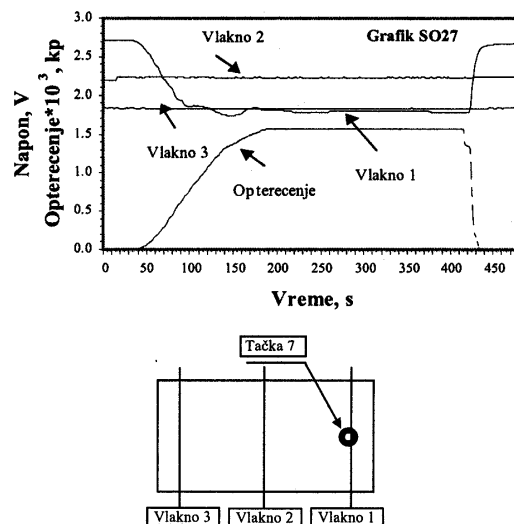
intenzitet signala se vraća na početni nivo što pokazuje da prilikom delovanja sile u ovoj tački nije došlo do oštećenja optičkog vlakna.

Tačka 5 nalazi se iznad vlakna 2. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1490 kp prikazani su na grafiku SO25 datom na slici 14.



Slika 14. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 5 uzorka SO2.

Na ovoj slici se vidi pad intenziteta signala kroz vlakno 2. Nakon rasterećenja materijala signal se vratio na početni nivo.



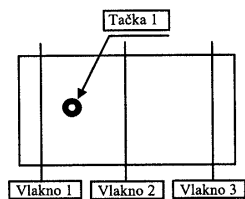
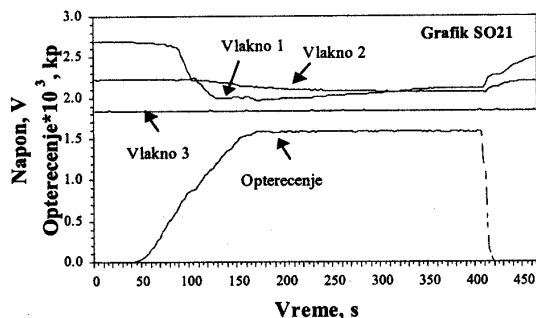
Slika 15. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 7 uzorka SO2.

Tačka 7 nalazi se iznad vlakna 1. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1596 kp prikazani su na grafiku SO27 datom na slici 15.

Na ovom grafiku se vidi da tokom ispitivanja dolazi do pada intenziteta signala kroz vlakno 1. Nakon rasterećenja materijala signal se vratio na početni nivo.

- Ispitivanje tačka na gornjoj strani -

Tačka 1 nalazi se između vlakana 1 i 2, bliže vlaknu 1. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1600 kp prikazani su na grafiku SO21 datom na slici 16.

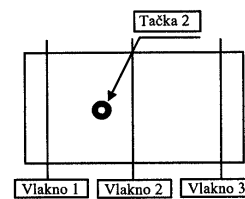
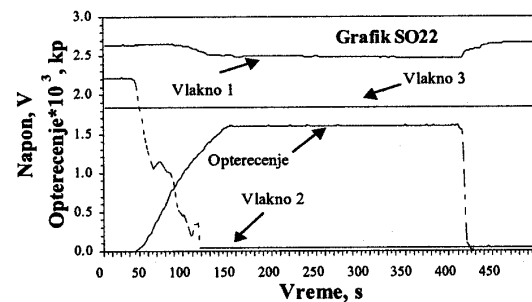


Slika 16. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 1 uzorka SO2.

Slika 16 pokazuje pad intenziteta signala i kroz vlakno 1 i kroz vlakno 2 pri čemu je pad signala veći za vlakno 1. Nakon rasteričivanja materijala signali su se vratili na početnu vrednost.

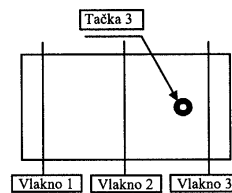
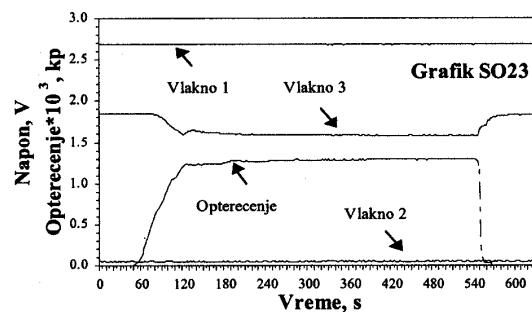
Tačka 2 nalazi se između vlakana 1 i 2, bliže vlaknu 2. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1626 kp prikazani su na grafiku SO22 datom na slici 17.

Ovaj grafik pokazuje blag pad intenziteta signala kroz vlakno 1 pri čemu se nakon rasterećenja materijala signal vratio na početnu vrednost i trajan pad intenziteta signala kroz vlakno 2 na minimalnu vrednost što ukazuje na pucanje vlakna 2.



Slika 17. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 2 uzorka SO2.

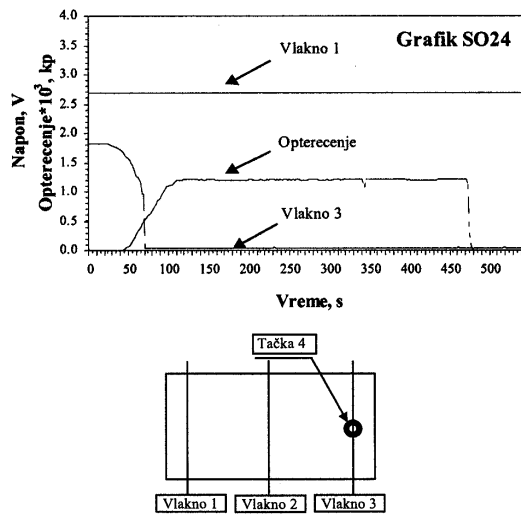
Tačka 3 nalazi se između vlakana 2 i 3, bliže vlaknu 3. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1296 kp su prikazani na grafiku SO23 datom na slici 18.



Slika 18. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 3 uzorka SO2.

Na ovoj slici se vidi blagi pad intenziteta signala kroz vlakno 3. Nakon rasterećenja materijala signal se vratio na početnu vrednost.

Tačka 4 nalazi se iznad vlakna 3. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 1220 kp prikazani su na grafiku SO24 datom na slici 19.



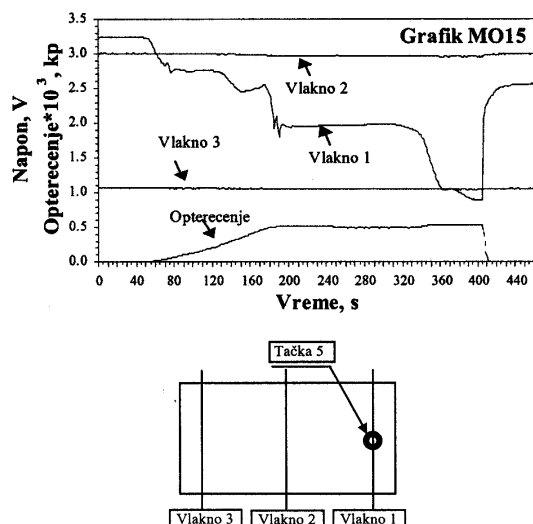
Slika 19. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 4 uzorka SO2.

Na ovoj slici se vidi trajan pad signala kroz vlakno 3 na minimalnu vrednost što ukazuje na lom vlakna 3.

5.3. Uzorak MO1

- Ispitivanje tačaka na donjoj strani -

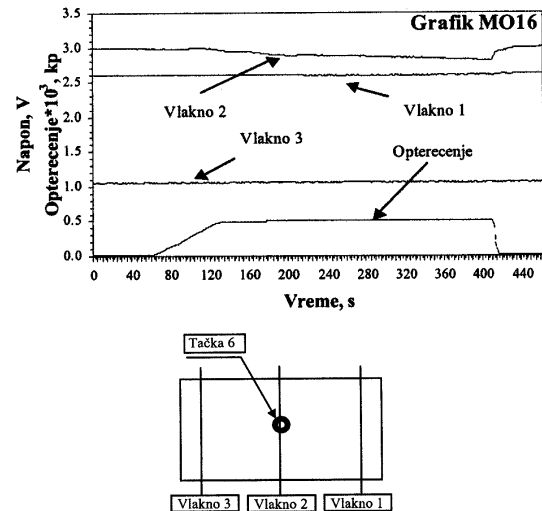
Tačka 5 nalazi se iznad vlakna 1. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 520 kp prikazani su na grafiku MO15 datom na slici 20.



Slika 20. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 5 uzorka MO1.

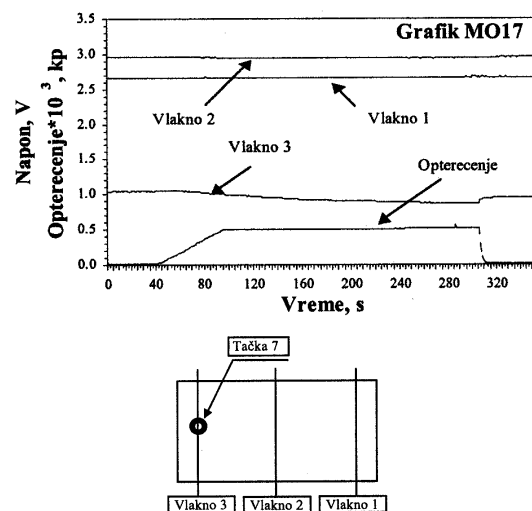
Na ovoj slici se vidi pad intenziteta signala kroz vlakno 1 pri čemu se nakon rasterećenja materijala signal nije vratio na početni nivo što ukazuje na trajno oštećenje vlakna 1.

Tačka 6 nalazi se iznad vlakna 2. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 490 kp prikazani su na grafiku MO16 datom na slici 21.



Slika 21. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 6 uzorka MO1.

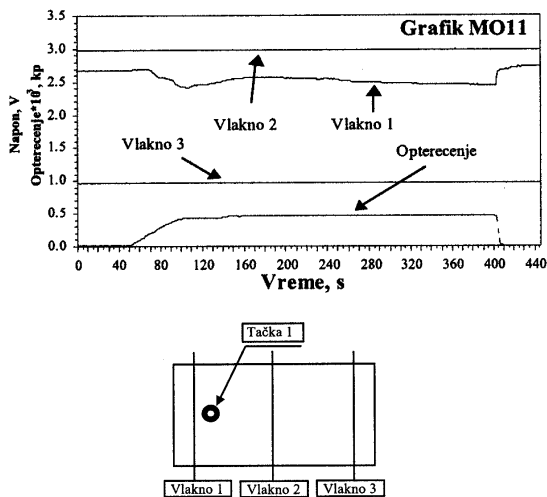
Tačka 7 nalazi se iznad vlakna 3. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 496 kp prikazani su na grafiku MO17 datom na slici 22.



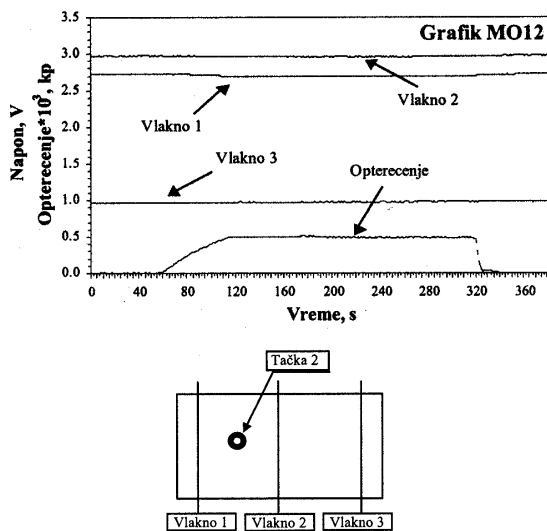
Slika 22. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 7 uzorka MO1.

Na ovom grafiku se vidi blagi pad intenziteta signala kroz vlakno 3. Nakon rasterećenja materijala signal se vratio na početnu vrednost.

- Ispitivanje tačka na gornjoj strani -



Slika 23. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 1 uzorka MO1.



Slika 24. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna pri delovanju sile na tačku 2 uzorka MO1.

Tačka 1 nalazi se između vlakana 1 i 2, bliže vlaknu 1. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 460 kp prikazani su na grafiku MO11 datom na slici 23.

Na ovom grafiku se uočava blagi pad intenziteta signala kroz vlakno 1. Nakon rasterećenja materijala signal se vratio na početnu vrednost.

Tačka 2 nalazi se tačno između vlakana 1 i 2. Rezultati merenja pri maksimalnoj primenjenoj sili od 480 kp prikazani su na grafiku MO12 datom na slici 24.

Ova slika pokazuje da nije došlo do pada intenziteta signala kroz vlakna tokom dejstva sile.

6. Zaključak

Termoplastični ortotropni slojeviti kompozitni materijali označeni kao O2, SO2 i MO1 napravljeni su naizmeničnim slaganjem 25 slojeva ojačanja i 24 sloja termoplastične matrice i kompaktiranjem postupkom toplog presovanja u zatvorenom kalupu. Kao ojačanje korišćena je aramidna tkanina za uzorak O2, staklena tkanina za uzorak SO2 i metalna mrežica za uzorak MO1. Kao matrica korišćena je folija poli(vinil butiral)-a. U toku izrade određene su optimalne vrednosti parametara toplog presovanja, temperature i pritiska, u zavisnosti od vremena, kao i optimalan sadržaj smole za svaki od uzoraka.

U napravljene kompozitne materijale ugrađena su po tri paralelno postavljena optička vlakna. Intenzitet signala kroz optička vlakna je praćen tokom njihovog procesa ugradnje. Dobijeni rezultati pokazuju da tokom procesa ugradnje optičkih vlakana pod uticajem temperature i pritiska ne dolazi do njihovog oštećenja.

Optička vlakna su ugrađena sa ciljem da imaju ulogu intenzitetnih senzora za detekciju mehaničkih oštećenja i deformacija u realnom vremenu. Sa tim ciljem praćeno je slabljenje intenziteta svetlosnog signala kroz optičko vlakno kao odziv na primenjeno statičko opterećenje. Željeni rezultat ovih ispitivanja je razvoj sistema za praćenje promena u strukturi termoplastičnih slojevitih kompozitnih materijala u cilju kontrole procesa izrade i ponašanja u realnim uslovima eksploatacije.

Ispitivanje je vršeno u dva slučaja. Prvi, kada su optička vlakna ugrađena u gornjem i drugi, kada su optička vlakna ugrađena u donjem sloju u odnosu na opterećenje. Ispitivanja u gornjem sloju su pokazala da dolazi do slabljenja svetlosnog signala kada je na

kompozitni materijal primenjeno opterećenje u neposrednoj blizini vlakana. U slučaju da sila deluje tačno iznad vlakna rezultati pokazuju da dolazi do trajnog pada intenziteta signala na minimum, odnosno do loma optičkog vlakna. Razlog pucanja vlakana je njihova očekivana preosetljivost na direktnu izloženost opterećenju. Ova optička vlakna se mogu koristiti za lokalizaciju mesta delovanja opterećenja.

Ispitivanja u donjem sloju pokazuju da do pada intenziteta signala kroz optička vlakna dolazi kada se naprezanje kroz materijal prenese na njih. Ovakvo postavljena optička vlakna se mogu koristiti za procenu dešavanja u termoplastičnom slojevitom kompozitnom materijalu podvrgnutom opterećenju.

Na kraju, može se zaključiti da su rezultati izvedenih ispitivanja potvrdili mogućnost korišćenja optičkih vlakana kao intenzitetnih senzora promena u strukturi termoplastičnih ortotropnih slojevitih kompozitnih materijala, pod dejstvom statičkog opterećenja, u realnom vremenu.

Literatura:

- [1] P.S. Uskoković; *Karakterizacija mehaničkih svojstava jednoosnih hibridnih kompozitnih materijala primenom optičkih vlakana*; doktorska disertacija, Beograd, 1999.
- [2] B. Hofer; Fibre optic damage detection in composite structures; *Composites*, 18, 1987, pp. 309-310.
- [3] R.A. Badcock, G.F. Fernando; An intensity-based optical fibre sensor for fatigue damage detection in advanced fibre-reinforced composites; *Smart Mater. Structure* 4, 1995, 223.
- [4] P.S. Uskoković, Lj. Brajović, M. Simić, S.S. Putić, R. Aleksić; An intensity based optical fibre for low velocity impact detection in unidirectional composites; *Adv. Composite Materials*, 7, 2000, 1,9,10.
- [5] P.S. Uskoković, I. Balać, Lj. Brajović, M. Simić, S. Putić, R. Aleksić; Delamination detection in woven composite laminates with embedded optical fibers; *Advanced Engineering Materials*, 3, 2001, 1, 4.
- [6] K. Kageyama, I. Kimpara, T. Suzuki, I. Ohsawa, H. Murayama, K. Ito; Smart marine structures: an approach to the monitoring of ship structures with fiber-optic sensors; *Smart Material Structure*, 7, 1998, 472.
- [7] R.M. Measures, N.D.W. Glossop, J. Lymer, M. Leblanc, J. West, S. Dubois, W. Tsaw, R.C. Tennyson; Structurally integrated fiber optic damage assessment system for composite materials; *Applied Optics*, 28, 1989, 2626.
- [8] S.R. Waite; Use of embedded optical fibre for significant fatigue damage detection in composite materials; *Composites*, 2.
- [9] C.D. Butter, G.B. Hocker; Fiber optics strain gauge; *Appl. Optics*, 17, 1978, pp. 2867-2869.
- [10] M. Srecković, S. Pantelić, A. Marinović, Z. Tomić, D. Nikolić, S. Travica, P. Uskoković, R. Aleksić; Some applications of optical fibres in medicine and disturbances in biomedical area; *Proceedings of SPIE*, 3573, 1998, 627.
- [11] M. Srecković, S. Pantelić, R. Aleksić, D. Nikolić, P. Uskoković, Z. Tomić, A. Marinović, I. Reljin, B. Reljin, S. Travica, M. Unić, V. Unić; Propagation of coherent light in optical fibre in diagnostics purposes in medicine and industry and disturbances; *Laser '98, Proceedings, SOQUE*, (Eds. V. J. Corcoan, T. Goldman), McLean, 1999, 575-582.
- [12] I.D. Živković, P.I. Perišić, R.R. Aleksić; Otpornost polimernih kompozitnih materijala na udar velike

- brzine; 21. internacionalna konferencija, Zbornik radova, Tara, Novembar 2001.
- [13] I.D. Živković, P.I. Perišić, Z.H. Burzić, S.S. Putić, R.R. Aleksić; Aramid fiber reinforced laminar thermoplastic composite materials; *Proc. 23rd SAMPE Europe Int. Conf.*, Pariz, april 2002.
- [14] I.D. Živković; *Udarne žilavost slojevitih kompozitnih materijala para-aramidno vlakno – poli(vinil butiral)*; magistarski rad, TMF Beograd, april 2002.
- [15] I.D. Živković, Lj.M. Brajović, P.S. Uskoković, R.R. Aleksić; Indentation Damage Detection in Thermoplastic Composite Laminates by Using Embedded Optical Fibers; *Journal of Advanced Materials*, u štampi.
- [16] F.R. Jones; *Handbook of Polymer-Fibre Composites*; Longman, 29-48, 231-234, 265-285, 1994.
- [17] T.W. Clyne, F.R. Jones; *Composites: Interfaces*; Encyclopedia of Materials: Science & Technology, Part Composites; Elsevier; 2001.
- [18] R.H. Zee, C.Y. Hsieh; Energy absorption processes in fibrous composites; *Materials Science & Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure & Processing*, 246(1-2), 161-168, 1998 May 15.