

ANALIZA PONAŠANJA SMART BALISTIČKIH KOMPOZITA: POREĐENJE EKSPERIMENTALNIH REZULTATA I NUMERIČKE SIMULACIJE

BEHAVIOR OF SMART BALLISTIC COMPOSITE MATERI- ALS: COMPARISONS EXPERIMENTAL RESULTS WITH NUMERICAL SIMULATIONS

Irena Živković^a, Stevan Maksimović^b, Slobodan Aleksić^b,
Ljiljana Brajović^c, Aleksandar Kojović^d, Radoslav Aleksić^d

^aInstitut za bezbednost- Beograd, ^bVojnotehnički institut, Katanićeva 15, Beograd

^cGrađevinski fakultet-Beograd, ^dTehnološko-metalurški fakultet-Beograd.



ABSTRAKT:

Cilj ovoga rada je istraživanje mogućnosti primene optičkih vlakana kao intenzitetnih senzora za detekciju oštećenja slojevitih kompozitnih materijala u realnom vremenu, kao i objašnjenje mehanizama prenosa opterećenja kroz termoplastični kompozitni materijal. Za eksperimentalne potrebe su napravljeni termoplastični slojeviti kompozitni materijali sa ugrađenim optičkim vlaknima. Ispitivana je konfiguracija kontinualnim vlaknima ojačanih kompozita aramidno vlakno/poli (vinil-butiral). Indikacija oštećenja i lom laminata tokom ispitivanja su detektovani padom intenziteta svetlosnog signala propuštenog kroz optička vlakna. Napravljeni uzorci termoplastičnih slojevitih kompozitnih materijala su nakon ugrađivanja optičkih vlakana, izloženi statičkom opterećenju utiskivanjem na adaptiranoj kidalici. Eksperimenti su potvrdili opravdanost upotrebe optičkih vlakana kao senzora za detekciju oštećenja višeslojnih kompozitnih materijala u realnom vremenu. Takođe, urađena je i numerička simulacija ponašanja materijala pri statičkom opterećenju i određeni kriterijumi inicijalnog loma za određivanje trenutka kada dolazi do otkaza sloja u materijalu. Za analizu raspodele deformacija po debljini višeslojne kompozitne ploče, pod dejstvom utiskivača, je korišćen metod konačnih elemenata (MKE). Primenom MKE je simuliran kontaktni problem projektil/kompozitna ploča. Rezultati MKE analize razmatrane kompozitne ploče su pokazali odlično slaganje sa eksperimentom.

Ključne reči: Praćenje oštećenja, termoplastični kompozitni materijali, intenzitetni fiberoptički senzori, utiskivanje, MKE

1. UVOD

Istraživanje smart materijala je relativno novo polje proisteklo iz istraživanja u severnoj

ABSTRACT:

The object of this paper is exploration of application of optical fibers as intensity-based sensors in real-time damage detection in laminate composite materials, and discussion of loading transfer mechanisms through thermoplastic composites.

For experimental purposes, thermoplastic laminate composite materials aramid fiber/poly (vinyl butyral) with embedded optical fibers were made. Initiation of damage and fracture during testing was detected by observation of the intensity drop of the light signal transmitted through optical fiber.

Manufactured composite specimens with embedded optical fibers were subjected to static loading indentation by the adapted tensile testing machine.

Results of the experiments confirmed that optical fibers may be applied as intensity sensors in real-time monitoring of structural changes in thermoplastic laminar composite materials.

Numeric simulation of material behavior under static loading was conducted, and initial fracture criteria were obtained. The finite element model was used to analyse deformation distribution through laminar composite plate, caused by indentation, and to simulate the contact problem - projectile/composite plate.

The FEM analysis results of the considered composite plate have shown very good agreement with the experimental results.

Key words: damage monitoring, thermoplastic composite materials, intensity-based fiber optic sensors, indentation, FEM

americi ranih 80-ih godina kada se radilo na integrisanju radarskih antena u površinu vojnih aviona da bi se dobila ljska sa smart svojstvima [1,2]. Proširenje ovog koncepta na smart ("inteligentne") materijale je proiza-

šlo iz potrebe za praćenjem stanja i oštećenja strukture i želje za dodatnom funkcionalnošću. Interdisciplinarna priroda istraživanja i razvoja smart materijala zahteva podršku iz različitih oblasti naučnih i inženjerskih tehnologija. Da bi se realizovao potencijal smart materijala neophodan je integralni pristup istraživanju koji obuhvata različite discipline kao što su detekcione tehnike, instrumentacija, metodologije procesiranja signala i nauka o materijalima. Najnovija istraživanja i progres detekcionih i pokretačkih tehnologija su omogućile značajne prodore u razvoju smart materijala posebno u aeronautičkoj industriji [3], građevinarstvu [4] i nautici [5].

Razvoj smart materijala je posebno značajan za inženjerske komponente jer poboljšava njihovu sigurnost u radu kroz ranu detekciju oštećenja. Ostale potencijalne dobiti uključuju veću operacionu efikasnost kod aerodinamički zahtevnih materijala kroz njihovu sposobnost da podese svoje dinamičke karakteristike [6,7], kao i kroz sposobnost za samoreparaciju [8,9].

Prvi korak u razvoju smart materijala je omogućavanje detekcionih sposobnosti u komponentama. Zbog ovoga su se mnoga istraživanja fokusirala na razvoj brojnih senzora i detekcionih tehnika. Premda su dostupni senzori kao što su električni merači deformacije, piezoelektrični filmovi i mikrosenzori, senzori od optičkih vlakna se ipak nameću kao najčešći izbor. Integracija optičkih vlakana u širok opseg glavnih konstrukcionih materijala, kao što su metali [10], beton [11] i kompoziti [12-14], su samo pokazali raznovrsnost i potencijal koji ovi lagani senzori nude.

Veliki broj objavljenih radova o smart materijalima razmatra primenu optičkih vlakana kao senzora u kompozitnim materijalima [15-22]. Ova integracija je prirodan korak jer je povećana upotreba kompozitnih materijala kao primarnih i sekundarnih materijala u različitim industrijskim sektorima.

U aeronautičkoj industriji detekcija i praćenje oštećenja usled zamora su glavni izazovi u odrađivanju letelica. Pregled avionskih nesreća pokazuje da je značajan broj incidenata izazvan zamorom materijala. Da bi se zadovoljile sigurnosne procedure vezane za vođenje letelica, praćenje zamora je kritično zbog povećanih proizvodnih i operativnih troškova letelica a samim tim i pritiska na avio kompanije da produže operativni vek njihovih letelica. Održavanje, kontrole, modifikacije, popravke i zamene su skupe procedure a direktna su posledica zamora materijala pa je prema tome jasna potreba proizvođača aviona da razvije savremene sisteme za praćenje zamora.

U razvoju smart kompozitnih materijala mnogo napora je uloženo za detekciju oštećenja izazvanog udarnim opterećenjima zbog činjenice da su laminatne konstrukcije ekstremno osetljive na vanravansko opterećenje. Kao posledica anizotropije u ovim višeslojnim materijalima oštećenje ima tendenciju širenja sve do krajnjeg loma. Poznato je da se mikroskopska prslina u matrici može proširiti pod kontinualnim opterećenjem što može imati katastrofalne posledice ukoliko se ne otkrije na vreme [23].

Ovaj rad se fokusira na upotrebu intenzitetnih fiberoptičkih senzora u razvoju smart kompozitnih materijala. Preliminarna istraživanja urađena na termoplastičnom laminarnom kompozitnom materijalu para-aramidno vlaknopol(vinil butiral) [24] pokazala su da ovaj materijal ima 5.5 puta veću sposobnost apsorpcije energije od do sada tradicionalno korišćenih materijala sa istim ojačanjem, ali mehanizmi preko kojih se apsorbuje energija kroz materijal nisu dovoljno obrađeni što će predstavljati predmet istraživanja koja će obuhvatiti ovaj rad. Sa tim ciljem u pomenuti kompozit su ugrađeni fiberoptički senzori intenzitetnog tipa i dobijeni smart materijal je ispitivan utiskivanjem. U cilju numeričke simulacije ponašanja kompozitne ploče pod dejstvom statičkih opterećenja korišćen je MKE.

2 PRIKAZ SVOJSTAVA KOMPOZITNOG MATERIJALA

Kao ojačanje je korišćena aramidna tkanina Kevlar 129¹ površinske mase 280 g/m², gustine 1.44 g/cm³, zatezne čvrstoće 3380 MPa, izduženja pri kidanju 3.4 % temperature dekompozicije 560 °C.

Kao matrica su korišćene folije poli(vinilbutirala) (PVB). Svojstva termoplastičnog PVB² su: gustina 1.058 g/cm³, zatezna čvrstoća 23 MPa, izduženje pri kidanju 210 %, modul elastičnosti 5 MPa, Poasonov odnos ±0.5, temperatura staklastog prelaza 16 °C i tvrdoća po Šoru "A" 64. Kao senzori su korišćena multimodna optička vlakna. Svojstva optičkih vlakana³ su: prečnik jezgra 62.5 μm, prečnik omotača 125 μm, prečnik primarne zaštite 250 μm, opseg radnih talasnih dužina 850÷1300 nm, propusni opseg 522÷748 MHz/km, numerička apertura 0.27.

Od definisanih sastavnih komponenti napravljen je laminarni kompozitni materijal metodom toplog presovanja [24]. Udeli sastavnih komponenti u dobijenom kompozitu su dati u tabeli 1.

¹ Original properties given by manufacturer-Kevlar[®](DuPont's registered trade-mark for poly(p-phenyleneterephthalamide))

² Original properties given by manufacturer-Saflex[®](Monsanto Company's registered trade-mark for poly(vinylbutyral))

³ Original properties given by manufacturer (Iskra Opto-elektronika)

Tabela 1 Udeo sastavnih komponenti u kompozitnom materijalu

Uzorak	Vrsta ojačanja	Masa ojačanja, g	Konačna masa uzorka, g	Udeo ojačanja	Udeo matrice
KOJA1	Aramidno vlakno	150,0	230,0	65,2	34,8

U poslednji sloj kompozitnog materijala su ugrađena optička vlakna prema razvijenom postupku [25]. Mehanička svojstva dobijenog laminarnog kompozita su prikazana u tabeli 2.

Tabela 2 Mehanička svojstva kompozitnog materijala

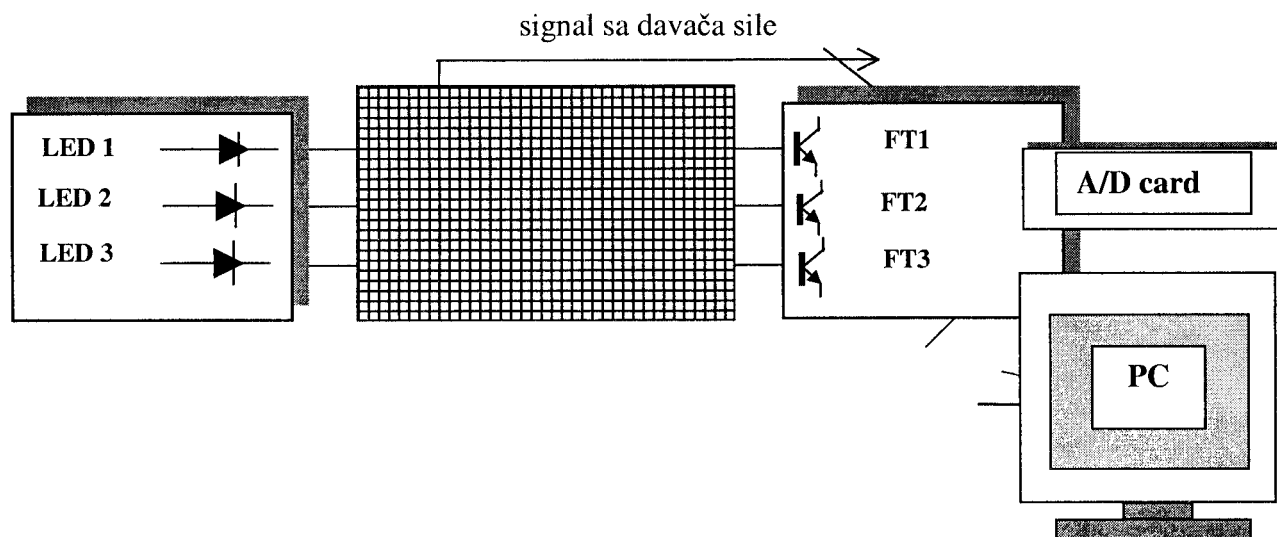
E_{11} , GPa	14.99
E_{22} , GPa	14.98
E_{33} , MPa	450
G_{12} , MPa	400
G_{13} , MPa	200
G_{23} , MPa	200
ρ , kg/m ³	1413
$\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$,	0.3, 0.2, 0.2

3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI ISPITIVANJA UTICAJA STATIČKOG OPTEREĆENJA NA KOMPOZITNI MATERIJAL I DISKUSIJA REZULTATA

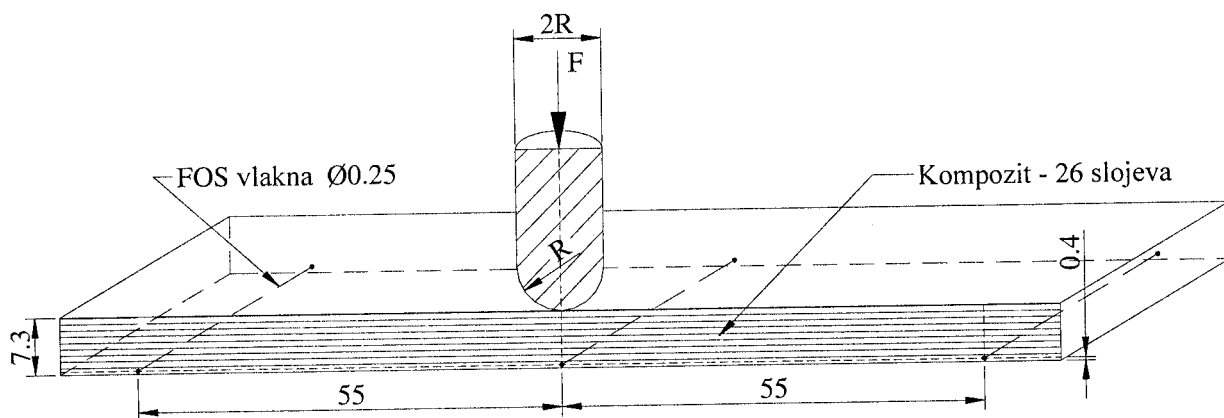
3.1 Ispitivanje pomoću ugrađenih optičkih senzora

Napravljeni uzorci termoplastičnih slojevitih kompozitnih materijala su nakon ugrađivanja optičkih vlakana izloženi statičkom opterećenju. Opterećenje je vršeno utiskivanjem na adaptiranoj kidalici. Položaj optičkih vlakana je u poslednjem sloju u odnosu na delovanje opterećenja.

Optoelektronski deo mernog sistema predstavljen na slici 1, se sastoji od emitterskih 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 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. Pri ispitivanju uzoraka vršena je istovremeno akvizicija izlaznog signala sa pretvarača za merenje nanetog opterećenja. Položaj utiskivača tokom ispitivanja je prikazan na slici 2.



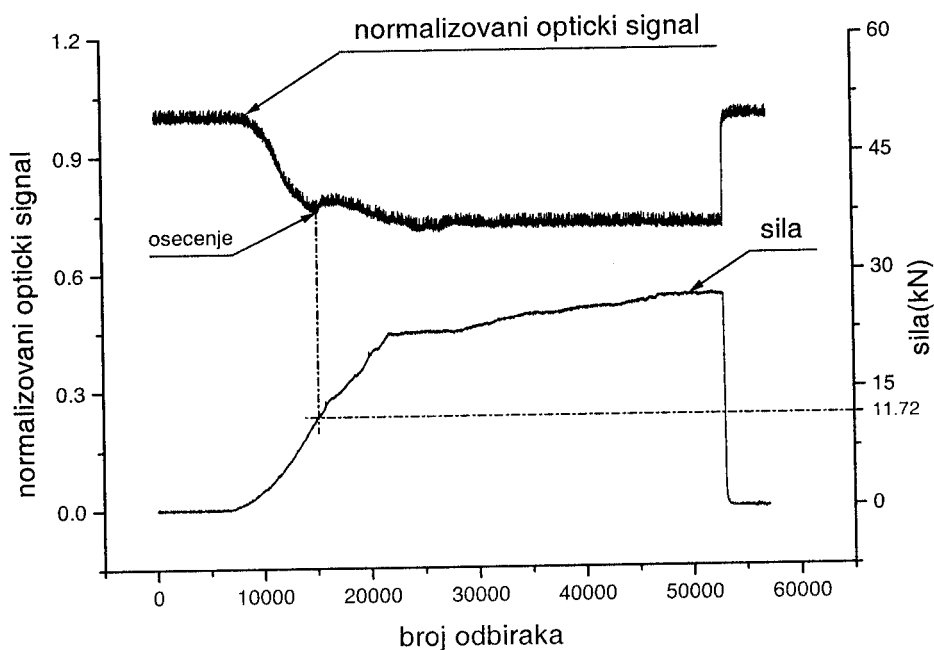
Slika 1: Optoelektronski deo mernog sistema



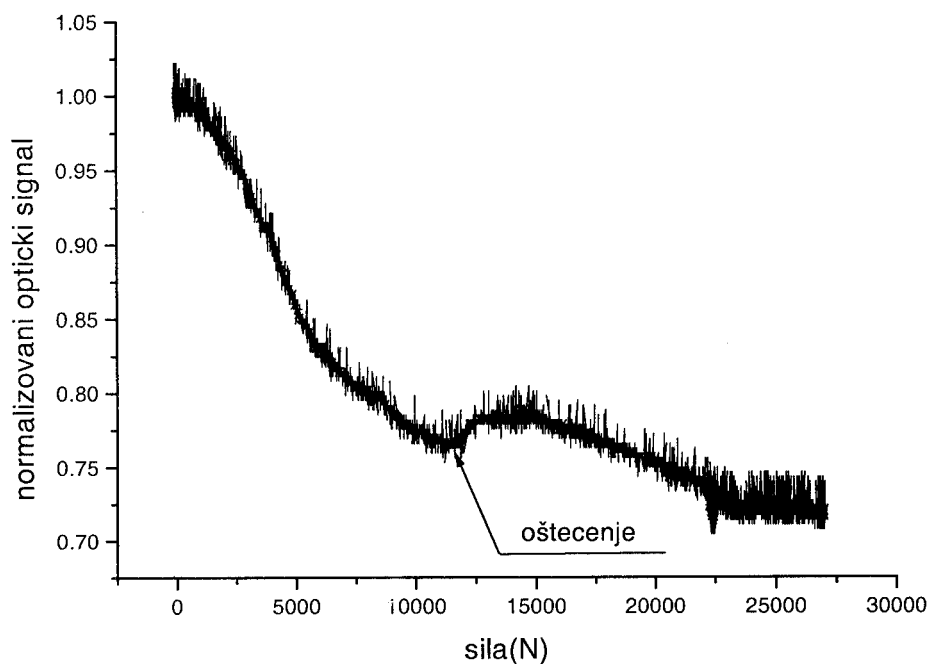
Slika 2: Položaj utiskivača tokom ispitivanja

Dobijeni rezultati su prikazani na slikama 3 i 4 i pokazuju pad intenziteta signala kroz optičko vlakno 1, koje se nalazi tačno ispod mesta utiskivanja. Intenzitet signala pada proporcionalno povećanju primenjene sile, odnosno sa porastom lokalnog naprezanja oko optičkog vlakna (slika 3). Kada sila dostigne vrednost od 11.72 kN intenzitet signala raste što ukazuje na smanjenje lokalnog naprezanja oko optičkog vlakna (slika 4). Ova pojava ukazuje da usled probijanja prvog sloja kompozitnog materijala utiskivač nailazi na termoplastičnu matricu tj. na sredinu manje čvrstoće te je

naprezanje oko optičkog vlakna manje. Intenzitet signala raste sve dok utiskivač ne dotakne drugi sloj kompozitnog materijala, kada naprezanje oko optičkog vlakna ponovo raste a kao posledica ove pojave intenzitet signala kroz optička vlakna ponovo počinje da pada. Primenjena sila uzrokuje mikrosavijanje optičkog vlakna i promenu oblika njegovog poprečnog preseka. Nakon rasterećivanja intenzitet signala se vraća na početnu vrednost što ukazuje na neoštećenost optičkih vlakana tokom testiranja. Maksimalna uvedena sila iznosi 27.50 kN.



Slika 3: Promena intenziteta signala kroz optička vlakna tokom utiskivanja



Slika 4: Promena intenziteta signala kroz optička vlakna u zavisnosti od primenjene sile

Tabela 3: Eksperimentalno dobijeni i izračunati rezultati određivanja pritiskne čvrstoće materijala

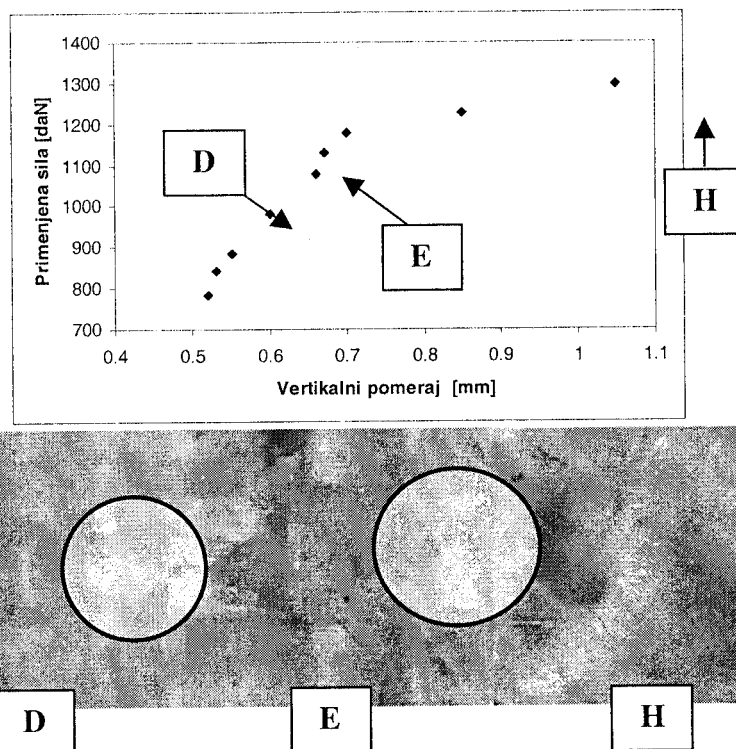
Tačka	Opterećenje, kg	Prečnik otiska d, mm	Dubina otiska w, mm	Sila F, daN	Pritisna čvrstoća HB, MPa
A	800	4.750	0,52	784.8	422.6
I	860	4.790	0.53	843.7	446.4
B	900	4.850	0.55	882.9	455.0
C	1000	5.060	0.60	981.1	462.3
D	1100	5.280	0.66	1079.1	464.5
G	1150	5.330	0.67	1128.1	476.0
E	1200	5.430	0.70	1177.2	477.3
F	1250	5.950	0.85	1226.2	408.1
H	1320	6.552	1.05	1294.9	348.6

3.2 Određivanje vertikalnog pomeraja utiskivača

Opterećivanje uzorka je vršeno na aparaturi za određivanje pritiskne čvrstoće materijala. Za utiskivanje je korišćena kuglica prečnika $D=11.287\text{mm}$ (metoda za merenje tvrdoće po Janku). Da bi otisak bio jasno vidljiv kuglica je garavljena vrhom plamena. Prečnici otiska (d) su mereni mikrometerskim zavrtanjem i izračunate su dubina otiska (w) i pritiska čvrstoća materijala (HB).

Eksperimentalno dobijeni i izračunati rezultati su prikazani u tabeli 3.

Zavisnost promene vertikalnog pomeraja u odnosu na primenjenu silu je data na slici 5. Sa desne strane dijagrama prikazani su mikroskopski snimci za odgovarajuće tačke i to za tačku D kada još uvek nije došlo do oštećenja prvog sloja materijala, tačku E kada dolazi do pucanja ojačanja i prava na dijagramu menja nagib i za tačku H koja je i poslednja tačka ispitivanja.



Sl. 5 Zavisnost vertikalnog pomeraja u odnosu na primenjenu silu i mikroskopski snimci karakterističnih tačaka utiskivanja

Dobijeni rezultati pokazuju naglu promenu nagiba krive nakon tačke E, odnosno pri primenjenoj sili od 11.772 kN. Ovo ukazuje da se oštećenje u prvom sloju materijala dešava upravo pri pomenutoj vrednosti primenjene sile. Nagli porast vrednosti vertikalnog pomeraja se takođe dešava nakon pomenute vrednosti što potvrđuje pretpostavku da je došlo do popuštanja prvog sloja kompozitnog materijala i smanjenja otpora materijala u odnosu na primenjenu opterećenje.

4. ANALIZA KOMPOZITNOG PANELA PRIMENOM MKE

U cilju uspostavljanja numeričkog modela ponašanja kompozitne ploče pod dejstvom statičkog opterećenja korišćen je MKE. Analiziran je segment kompozitne ploče – deformacija u kompozitnoj ploči, a na dijagramima su prikazani uporedno sa eksperimentom.

Rotacioni isečak od 15 stepeni, dužine ~ 18.5 mm i debljine 7.3 mm, potpuno oslonjen na ravnu krutu podlogu, koji je pritisnut čeličnim pritiskačem sa poluloptom u zoni kontakta, prečnika $D = 11.287$ mm. Pritisna sila odgovara segmentu (segm.15 stepeni – $1/24 \cdot F_{uk}$).

Za određene mehaničke karakteristike materijala (kompozitni 3D ortotropni materijal), konturne

uslove oslanjanja ploče (slobodno oslonjena na ravnu krutu podlogu), i različite nivoe opterećenja–pritisne sile F , dobijene su odgovarajuće naponi i vertikalna pomeranja čeličnog pritiskača (dubina otiska).

Model konačnih elemenata kreiran je za segment radi pojednostavljenja, pri čemu su rezultati analogni - odgovaraju kompletnoj kompozitnoj ploči, sa kojom je izvršeno merenje – eksperiment.

Rezultati proračuna – strukturalne analize metodom konačnih elemenata na računaru prikazani su na slikama raspodele napona i pomeranja. Utiskivač je od izotropnog materijala vrlo visoke krutosti i njegov mehanička svojstva su data u tabeli 4.

Tabela 4: Mehaničke karakteristike materijala utiskivača

Modul elastičnosti, MPa	50
Modul smicanja, MPa	19.38
Poasonov odnos	0.29
Gustina, kg/m^3	7820

Kompozitni materijal je višeslojna kompozitna ploča dimenzija $142 \times 157 \times 7.3 \text{ mm}^3$ i sastoji se od 26 slojeva aramidne tkanine u matrici od PVB.

Laminatni materijal, u MKE analizi je zamenjen analognim 3D kompozitnim materijalom, sa iz-

merenim mehaničkim karakteristikama za 3D epruvetu, isečenu iz kompozitne ploče (tabela 2).

Strukturalna analiza izvršena je metodom konačnih elemenata (MKE) koristeći softver MSC/NASTRAN.

Tip analize: kontaktni problem – nelinearna statička analiza.

Na slikama 6-8 prikazana je raspodela napona i deformacija na modelu konač. elemenata kompozitne ploče, za slučaj pritisne sile $F_{uk} = 1177.2$ daN (sila na segmentu $F = 49$ daN).

Na slici 9 i u tabeli 5 prikazane su uporedni rezultati dobijeni eksperimentalno i metodom konačnih elemenata.

Za određene vrednosti pritisne sile F , dobijene su odgovarajuće dubine otiska pritiskača w i sračunata pritisna čvrstoća HB . Na sl. 5, prikazano je vertikalno pomeranje (dubina otiska) w (mm) u zavisnosti od pritisne sile F (daN), dobijene eksperimentom.

Na dijagramu uočavamo karakterističnu tačku E: sila $F=1177.2$ daN, dubina otiska – ugib $w=0.7$ mm. U ovoj tački došlo je do otkaza – inicijalnog loma prvog sloja – lamine kompozitnog materijala ploče na mestu kontakta sa pritiskačem. Daljim porastom sile F ugib w drastično raste (tačke F i H u tabeli 3, sl.5).

Na slici 8 prikazani su rezultati MKE analize. Nivo pritisne sile F isti je kao u eksperimentu.

Dobijeni rezultati MKE prikazani su uporedno sa eksperimentom na slici 9 i u tabeli 4.

Uočavamo dosta dobro poklapanje MKE sa eksperimentom za vertikalno pomeranje – ugib

u zoni do tačke E ($F=1177.2$ daN). Poklapanje je na nivou 1 – (2-3)%, i to do 1% u zoni

većeg opterećenja. Analiza – upoređenje MKE sa eksperimentom za dalji porast sile je bezpredmetna jer je došlo do otkaza prvog sloja – lamine kompozita i tada bi trebalo izvršiti analizu posnašanja. Takva analiza je moguća primenom MKE ali je to izvan opsega ovog rada.

Znači, u cilju analize ponašanja kompozitnog panela pod statičkim opterećenjem izvršena je numerička analiza primenom MKE. Primarni cilj analize su vertikalna pomeranja i deformacije kompozitnog panela pod dejstvom opterećenja utiskivača. Na Sl. 6 prikazan je model kompozitnog panela sa utiskivačem. Namera je da utiskivač preuzme ulogu modela metka.

Da bi se adekvatno opisalo ponašanje kompozitnog panela pod statičkim opterećenjem: sistem

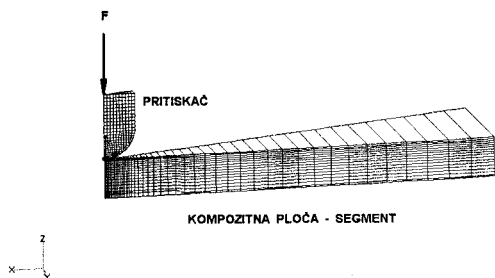
kompozitni panel/ utiskivač je modeliran kao kontaktni problem, Sl 7. Budući da se sa jedne strane panela postavljaju intezitetni fiberoptički senzori jedan od primarnih ciljeva strukturalne analize predstavlja određivanje raspodele pomeranja/deformacija kompozitnog panela u zoni senzora. Cilj je da se uspostave relacije (zavisnosti) između električnog signala u optičkom vlaknu i pomeranja (deformacije) kompozitnog panela u zoni senzora, odnosno u samom senzoru.

Jedan od primarnih pokazatelja za uspostavljanje ovih zavisnosti ostvarena je preko nivoa opterećenja pri kome se javlja inicijalni lom u kompozitnom panelu na mestu kontakta utiskivača sa panelom. Pri statičkom opterećivanju (utiskivanju) – sa povećavanjem opterećenja numerički su određena vertikalna pomeranja po celoj debljini panela. Zavisnost između opterećenja i pomeranja u panelu, primenom MKE, data su u Tabeli 5. Da bi se verifikovala tačnost rezultata izvršena su i merenja pomeranja utiskivača u zavisnosti od nivoa opterećenja. Uporedne vrednosti vertikalnih pomeranja (w) određenih numerički i eksperimentalno data su u tabeli 5 kao i na Sl. 9. Svakako ovde su date samo uporedne vrednosti pomeranja vrha utiskivača, odnosno pomeranje u kompozitnom panelu na mestu kontakta sa utiskivačem. Iz slike 9 evidentna je izuzetno dobra saglasnost između proračuna i eksperimenta. Ta saglasnost je potpuna do nivoa opterećenja pri kome se javlja inicijalni lom u sloju kompozita koji je u kontaktu sa utiskivačem. Rezultati numeričke analize i eksperimenta, posle otkaza prvog sloja u kompozitnom panelu, se razilaze. To je iz razloga što u numeričkoj analizi nije smanjena krutost oštećenog sloja. To i nije bilo od posebnog interesa za ovu analizu. Predmet ove analize upravo je bio da se odredi nivo opterećenja pri kome se javlja inicijalni otkaz u nekom od slojeva u kompozitnom panelu, a to su upravo slojevi u neposrednom kontaktu utiskivača i panela.

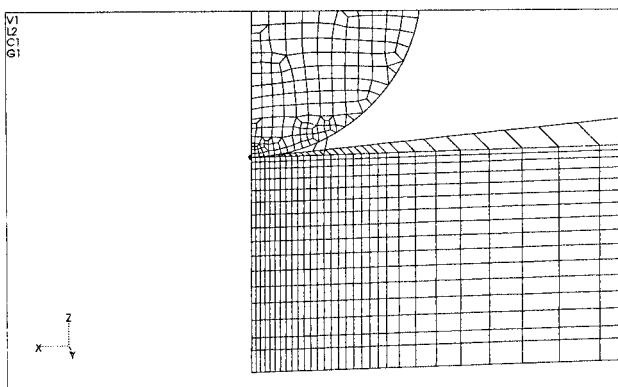
Vrednost opterećenja pri kome se javlja inicijalni otkaz eksperimentalno je utvrđen na nivou opterećenja $F= 11720$ N (slika 5). Budući da se rezultati numeričke analize na bazi MKE, u pogledu pomeranja na mestu kontakta utiskivača i panela, slažu sa eksperimentima to se može smatrati da su numeričke analize valjane za definisanje pomeranja i deformacija u celoj zoni kompozitnog panela a time i u zoni ugrađenog fiberoptičkog senzora što je i bio primarni cilj uključivanja numeričke analize u razmatranja.

S druge strane, merenje pada intenziteta optičkog signala, iskazano preko pada napona na fotode-

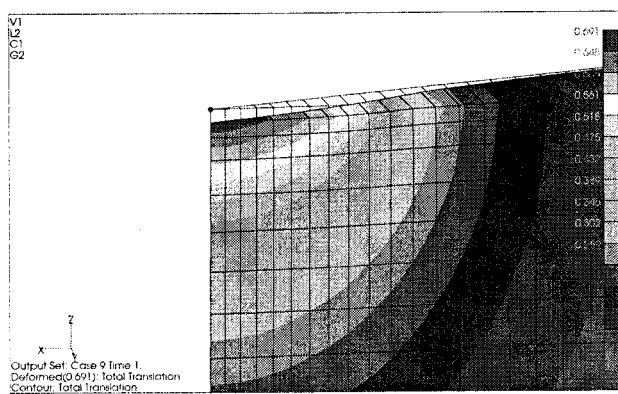
tektoru, slike 3 i 4, pokazuje da se isti javlja pri sličnoj vrednosti opterećenja $F = 11.77 \text{ kN}$ što sa svoje strane potvrđuje da je senzor "u funkciji opterećenja".



Slika 6 Model konačnih elemenata segmenta kompozitne ploče



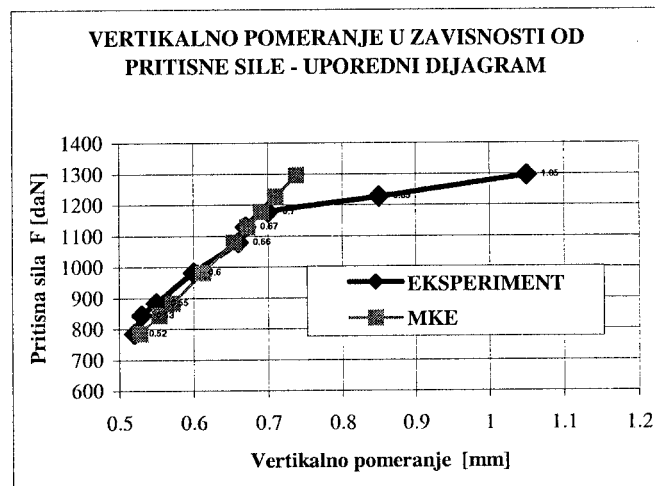
Slika 7 Mreža modela konačnih elemenata u zoni kontakta - uvećano



Slika 8 Raspodela pomeranja u zoni kontakta – dubina prodiranja pritiskača u kompozitnu ploču, uvećano

Tabela 5 Vertikalno pomeranje u zavisnosti od pritiskne sile – uporedni pregled: eksperiment – MKE ($w = 0.5 * (D - \sqrt{D^2 - d^2})$)

Tačka	Pritisna sila F (daN)	Dubina otiska Experiment w (mm)	MKE - metod w (mm)
A	784.8	0.52	0.528
I	843.7	0.53	0.554
B	882.9	0.55	0.572
C	981.1	0.60	0.613
D	1079.1	0.66	0.654
G	1128.1	0.67	0.672
E	1177.2	0.70	0.691
F	1226.2	0.85	0.710
H	1294.9	1.05	0.738



Slika 9 Uporedni dijagram eksperimentalnih rezultata i proračuna za zavisnost vertikalno pomeranje - pritiskača

5. ZAKLJUČAK

Ispitivani su termoplastični balistički kompozitni materijali aramidno vlakno-PVB sa ugrađenim optičkim vlaknima. Optička vlakna su ugrađena sa ciljem da imaju ulogu intenziteta senzora za detekciju mehaničkih oštećenja i deformacija u realnom vremenu. Sa tim ciljem praceno 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

pomenutih materijala i njihovog ponašanja u realnim uslovima eksploatacije.

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

Eksperimentalni rezultati pokazuju da do otoka prvog sloja materijala dolazi kada primenjena sila dostigne vrednost od 11.77 kN. Pri ovoj vrednosti sile vertikalni pomeraj utiskivača iznosi 0.7mm a na krivoj zavisnosti intenziteta optičkog signala od primenjene sile se javlja pik. Rezultati dobijeni numeričkim simulacijom na bazi MKE pokazuju odlično slaganje sa eksperimentom sa odstupanjem od 2-3 %. Ovo sa svoje strane pokazuje da se MKE može pouzdano koristiti u opisivanju ponašanja kompozitne ploče pod dejstvom statičkog opterećenja kao i za određivanje nivoa opterećenja pri kome se javlja inicijalni lom.

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

LITERATURA

- [1] Spillman Jr WM, and Claus RO (1999), Sensory phenomena and measurement instrumentation for smart structures and materials: Conference overview, SPIE 3330, 2-5.
- [2] Udd E (1999), Early efforts to initiate the field of fiber optic smart structures at McDonnell Douglas, SPIE 3330, 12-18.
- [3] Friebele EJ, Askins CG, Bosse AB, Kersey AD, Patrick HJ, Pogue WR, Putnam MA, Simon WR, Tasker FA, Vincent WS, and Vohra ST (1999), Optical fiber sensors for spacecraft applications, *Smart Mater. Struct.* 8, 813-838.
- [4] Bronnimann R, Nellen PM, and Sennhauser U (1998), Application and reliability of fiber optical surveillance system for a stay cable bridge, *Smart Mater. Struct.* 7, 229-236.
- [5] Kageyama K, Kimpara I, Suzuki T, Ohsawa I, Murayama H, and Ito K (1998), Smart material structure marine structures: an approach to the monitoring of ship structures with fiber-optics sensors, *Smart Mater. Struct.* 7, 472-478.
- [6] Crawley E and de Luis J (1987), Use of piezoceramic actuators as elements of intelligent structures, *AIAA J.* 25, 1373-1385.
- [7] Nitzsche F and Breitbach E (1994), Individual blade control of hinged blades using smart structures, *Smart Mater. Struct.* 3, 171-180.
- [8] Dry CM (1994), Matrix cracking repair and fillings using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into matrices, *Smart Mater. Struct.* 3, 118-123.
- [9] Dry CM (1994), Smart material structure multiphase composite materials which repair themselves by a release of liquids which become solids, *SPIE* 2189, 62-70.
- [10] Hale KF (1992), An optical-fiber fatigue crack-detection and monitoring system, *Smart Mater. Struct.* 1, 156-161.
- [11] Fuhr PL, Huston DR, Kajenski PJ, and Ambrose TP (1992), Performance and health-monitoring of the Stanford Medical Building using embedded sensors, *Smart Mater. Struct.* 1, 63-68.
- [12] Badcock RA and Birt EA (2000), The use of 0-3 piezocomposite embedded Lamb wave sensors for detection of damage in advanced fiber composites, *Smart Mater. Struct.* 9, 291-297.
- [13] Murukeshan VM, Chan PY, Ong LS, and Asundi A (1999), On-line health-monitoring of smart composite structures using fiber polarimetric sensor, *Smart Mater. Struct.* 8, 544-548.
- [14] Gandhi MV, Thompson BS, Kasiviswanathan SR, and Choi SB (1992), A Collage of experimental investigations on smart fibrous composite structures and mechanical systems featuring electro-rheological fluids, piezoelectric materials and fiber-optic sensors, *Composites Engineering* 2, 561-571.
- [15] Hofer B (1987), Fiber optic damage detection in composite structures, *Composites* 18, 309-316.
- [16] Friebele EJ, Askins CG, Bosse AB, Kersey AD, Patrick HJ, Pogue WR, Putnam MA, Simon WR, Tasker FA, Vincent WS, and Vohra ST (1999), Optical fiber sensors for spacecraft applications, *Smart Mater. Struct.* 8, 813-838.
- [17] Crane RM, Macander AB, and Gagorik J (1983), Fiber optics for a damage assessment system for fiber reinforced plastic composite structures, *Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval.* 2B, 1419-1430.

- [18] Lee CE, Alcoz JJ, Yeh Y, Gibler WN, Atkins RA, and Taylor HF (1992), Optical fiber Fabry-Perot sensors for smart structures, *Smart Mater. Struct.* 1, 123–127.
- [19] Liu T, Wu M, Rao Y, Jackson DA, and Fernando GF (1998), A mul-tiplexed optical fiber-based extrinsic Fabry-Perot sensor system for in-situ strain monitoring in composites, *Smart Mater. Struct.* 7, 550–556.
- [20] LeBlanc M and Measure RM (1992), Impact damage assessment in composite materials with embedded fiber-optic sensors, *Composites Engineering* 2, 573–596.
- [21] Badcock RA, and Fernando GF (1995), An intensity-based optical fiber sensor for fatigue damage detection in advanced fiber-reinforced composites, *Smart Mater. Struct.* 4, 223–230.
- [22] Lee DC, Lee JJ, Kwon IB, and Seo DC (2001), Monitoring of fatigue damage of composite structures by using embedded intensity-based optical fiber sensors, *Smart Mater. Struct.* 10, 285–292.
- [23] Cantwell WJ, Curtis PT, and Morton J (1984), Impact and subsequent fatigue damage growth in carbon fiber laminates, *Int. J. Fatigue* 6, 113–118.
- [24] Živkovic I, Perisic P, Burzic Z, Uskokovic P, Aleksic R. Aramid fiber reinforced laminar thermoplastic composite materials, *Journal of Advanced Materials*, in press
- [25] Živkovic I, Brajovic Lj, Uskokovic P, Aleksic R. Indentation damage detection in thermoplastic composite laminates by using embedded optical fibers, *Journal of Advanced Materials*, in press.
- [26] Maksimovic, S., Improved nonlinear finite element analysis of layered composite structures using third order theory, *The Second Int. Conf. on Computational Structures Technology*, Atina, Sept. 1994., Eds. Topping, BVH and Papadrakakis, M., Civil Comp Press, 1994.
- [27] Maksimović, S., Instability analysis of layered composite structures using shell finite elements based on the third order theory, 4th. National Congress on Mechanics, Greece, Hanthi, 1995.
- [28] Maksimović, S., Ruzić, D., Maksimović, K., An improved 4-node shell finite element used in postbuckling and failure analysis, *LUX-FEM – 1st International Conference on Finite Element for Process*, Luxemburg, Luxemborg City, 13-14.11.2003.
- [29] Maksimović, S., Racionalan numerički pristup za optimizaciju kompozitnih struktura sa aspekta čvrstoće, krutosti i elastične stabilnosti, *Prvo jugoslovensko savetovanje: VLAKNIMA OJAČANI KOMPOZITI U INDUSTRIJI MOTORNJIH VOZILA*, Zbornik radova, Maj 1995, Kragujevac, Predavanje po pozivu.

CHRONOS Info

POSREDOVANJE

CROATIA BANKA, Zagreb
 PRIVREDNA BANKA, Zagreb
 POREZNA UPRAVA, Zagreb
 MINISTARSTVO FINANCIJA, Zagreb
 MUP RH, Zagreb
 INA NAFTAPLIN, Zagreb
 KONČAR - INSTITUT, Zagreb
 DINERB CLUB ADRIATIC, Zagreb
 INA NAFTAPLIN, Zagreb
 ERICSSON NIKOLA TESLA, Zagreb
 INFOBISTVENI, Zagreb
 CARNET, Zagreb
 PLIVA, Zagreb
 COMPUTECH, Zagreb
 ...

CERTIFIKATI

MICROSOFT
 ORTRONICS
 ALLIED TELESYN
 NOVELL
 SCHROFF
 ...

CHRONOS Info
 Razvoj i primjena informatičkih tehnologija

CHRONOS Info d.o.o.
 10000 Zagreb, Medvedgradska 35
 Tel: 01-4867-059, 01-4867-152
 Fax: 01-4867-153
 E-mail: chronos@zg.tkf.hr
 Web: www.chronos.hr

OMO
 Ovlašteni partneri:
 O.M.O. - The Journal of Terotechnology
 11078 BOSTON 02088, Tel: 617-339-1133
 Telex: 011/600-553

RAZVOJ I PRIMJENA INFORMATIČKIH TEHNOLOGIJA