

Irena Živković<sup>1</sup>  
Stevan Maksimović<sup>2</sup>  
Radoslav Aleksić<sup>3</sup>

## NUMERIČKA I EKSPERIMENTALNA ANALIZA INICIJALNOG OTKAZA KOMPOZITNIH LAMINATA SA UGRAĐENIM FIBEROPTIČKIM SENZORIMA

### NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF INITIAL FAILURE OF COMPOSITE LAMINATES WITH EMBEDDED FIBREOPTIC SENSORS

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK /UDC: 678.7-19.017

666.188.21:666.22

Rad primljen / Paper received: 20.12.2004.

Adresa autora / Author's address:

<sup>1</sup> Institut bezbednosti, Kraljice Ane bb, Beograd

<sup>2</sup> Vojnotehnički institut, Katanićeva 15, Beograd

<sup>3</sup> Tehnološko-metalurški fakultet, Karnegijeva 4, Beograd

#### Ključne reči

- praćenje oštećenja
- termoplastični kompozitni materijali
- intenzitetni fiberoptički senzori
- utiskivanje
- MKE

#### Izvod

U radu je proučavana pojava inicijalnog otkaza višeslojnih kompozitnih materijala pod dejstvom statičkog opterećenja, koristeći numeričku simulaciju metodom konačnih elemenata (MKE) s jedne, i eksperimentalnu metodu primenom fiberoptičkih senzore (FOS), s druge strane. Procedura je sprovedena na jednoj grupi poboljšanih termoplastičnih balističkih kompozitnih materijala para-aramidno vlakno – poli(vinil butiral) povećane žilavosti. Ovaj termoplastični višeslojni kompozit pokazao je oko 5,5 puta veću sposobnost apsorpcije energije od do sada korišćenih materijala sa istim ojačanjem. Izvršena je numerička simulacija ponašanja tog materijala sa ugrađenim fiberoptičkim senzorom pri statičkom opterećenju utiskivanjem i uz korišćenje kriterijuma inicijalnog loma za određivanje trenutka, odnosno nivoa opterećenja, kada dolazi do otkaza prvog sloja u višeslojnom materijalu. Za analizu raspodele napona i deformacija u višeslojnoj kompozitnoj strukturi pod dejstvom utiskivača korišćena je 3-D analiza MKE pri simulaciji kontaktnog problema projektil/kompozitna ploča. Rezultati MKE analize razmatrane kompozitne ploče, pokazali su dobro slaganje sa eksperimentom u pogledu detekcije nivoa opterećenja pri kome je došlo do inicijalnog otkaza uključivši i “komunikaciju” kompozitne strukture sa optičkim vlaknima.

#### UVOD

Optička vlakna kao fiberoptički senzori se koriste za praćenje stanja različitih inženjerskih materijala kao što su beton, polimerni kompozitni materijali i metalne legure. Zbog izvanrednih mehaničkih karakteristika kompozitni materijali su našli široku primenu u avio industriji i u nizu drugih grana industrije. Kompoziti ojačani vlaknima, za razliku od metala, imaju specifične oblike loma kao što su delaminacija, pucanje matrice i kidanje vlakana.

#### Keywords

- damage monitoring
- thermoplastic composite materials
- intensity-based fibre optic sensors
- indentation
- FEM

#### Abstract

Phenomenon of initial failure of laminar composite materials under static loading is studied in this paper by using numerical simulation based on finite element method (FEM) on one side, and experimental method applying fibre optic sensors (FOS) on the other side. Procedure has been conducted on the group of improved thermoplastic ballistic composite materials – para-aramid fibre – poly (vinyl butiral) of increased toughness. This thermoplastic laminar composite shows about 5.5 times higher capability of energy absorption compared to recently used materials with the same reinforcement. Numerical simulation of this material behaviour with embedded fibre optic sensor under static indentation is performed using criteria for determination of the initial failure time, e.g. loading level which causes failure of the first layer in laminated composite structures. For the analysis of stress and strain distribution within laminate composite structure under indenter pressure, 3-D FEM analysis is applied to simulate the projectile/composite plate contact problem. The results of FEM analysis of considered composite plate have shown good agreement with the experiment regarding the detection of loading level which initiates failure, including “communication” of composite structure with optical fibres.

#### INTRODUCTION

Optical fibres as fibre optical sensors have been used for monitoring the state in a wide range of engineering materials such as concrete, composite materials and metallic alloys. Due to excellent mechanical properties, composite materials have found extended use in aircraft industry and in many other industries. In contrast to metals, fibre reinforced composites exhibit specific modes of failure such as delamination, matrix cracking and fibre fracture.

Da bi se obezbedio siguran rad konstrukcije, značajna istraživanja i objavljeni radovi su usmereni na konstrukcije naprednih kompozitnih materijala sa integrisanim optičkim vlaknima, senzorima za detekciju oštećenja. Konstrukcije sa ugrađenim senzorima za detekciju oštećenja su nazvane "pametne" (*smart*) konstrukcije.

Brojni fiberoptički senzori se upotrebljavaju u razvoju *smart* konstrukcija /1,2/, a najznačajniji su Bragove rešetke, intenzitetni senzori, polarimetarski senzori i različiti interferometarski senzori bazirani na Fabri-Pero, Mah-Zender i Majkelson konfiguracijama. I pored njihovih ograničenja, ovi senzori su sposobni za merenje specifičnih kvantitativnih veličina kao što su deformacija i temperatura. Za napredne kompozitne konstrukcije, primeri praćenja stanja uključuju detekciju udarnog oštećenja /3–6/ i delaminacije /7/, merenje deformacija konstrukcije /8,9/, praćenje rasta prslina u sistemu popravljenog lepljenjem /10–12/, detekciju transversalnih prslina /13,14/ i detekciju oštećenja izazvanog zamorom /15,16/. Od fiber optičkih senzora dostupnih u literaturi, Bragove rešetke imaju značajno mesto zbog niza prednosti u odnosu na druge optičke senzore. Bitne prednosti ovih senzora su stabilnost signala i pogodnost za istovremeno merenje u velikom broju tačaka (*multiplexing*). Bragove rešetke nisu osetljive na promene snage izvora, jer je kod njih detekcija zasnovana na merenju promene spektralne transmisije ili refleksije rešetke.

Intenzitetni fiberoptički senzori predstavljaju ranu i osnovnu grupu optičkih senzora koji se koriste za praćenje integriteta konstrukcije /17/. Oni su atraktivni zbog lakog interpretiranja intenziteta signala kroz optičko vlakno. Mnogi od radova bazirani su na filozofiji loma optičkog vlakna, mada je i merenje malih promena u intenzitetu svetla (*mikrobend* senzori) pokazalo dosta uspeha, /18/.

Sposobnost interferometarskih fiberoptičkih senzora da mere deformaciju su prvo demonstrirali Bater i Hoker, /19/. Ovi senzori se oslanjaju na promenu u fazi optičkog signala kao rezultat promene dužine optičke putanje indukovane uvedenom deformacijom. Široka kategorija senzora omogućava veoma visoku rezoluciju merenja. Od svih dostupnih interferometarskih senzora, Fabri-Pero senzori se najviše koriste. Njihova upotreba je uspešno prikazana od strane mnogih autora /20,21/ koji su pokazali da su ovi senzori veoma pogodni za upotrebu u *smart* konstrukcijama zbog svoje pogodnosti za brojne oblasti detekcije, velike rezolucije i mogućnosti merenja u ograničenom prostoru.

Ovaj rad je usmeren na upotrebu intenzitetnih fiberoptičkih senzora u razvoju *smart* kompozitnih materijala. Preliminarna istraživanja izvedena na termoplastičnom višeslojnom kompozitnom materijalu para-aramidno vlakno-poli(vinil butiral) /22/ pokazala su da ovaj materijal ima 5,5 puta veću sposobnost apsorpcije energije od tradicionalno korišćenih materijala sa istim ojačanjem, ali mehanizmi apsorbovanja energije kroz materijal nisu dovoljno obrađeni, što je predmet istraživanja u ovom radu. Sa tim ciljem u pomenuti kompozit su ugrađeni FOS intenzitetnog tipa i dobijena *smart* konstrukcija je ispitivana utiskivanjem.

In order to ensure safe operation of structures, significant research and published papers concentrate on constructions of advanced composite materials with integrated optical fibres, sensor for damage detection. Constructions with embedded damage detection sensors are known as *smart* structures.

Numerous fibre optical sensors are used in development of *smart* structures /1,2/, and most important are Bragg gratings, intensity-based sensors, polarimetric sensors, and a range of interferometric sensors based on the Fabry-Perot, Mach-Zehnder, and Michelson configurations. In spite their limitations, these sensors have shown ability to measure specific quantities such as strain and temperature. For advanced composite structures, examples of health monitoring include detection of impact damage /3–6/ and delamination /7/, measurement of structural strains /8,9/, the monitoring of crack propagation in bonded repair systems /10–12/, the detection of transverse cracks /13,14/ and detection of fatigue induced damage /15,16/. Among the optical fibre sensors reported in literature, fibre Bragg grating sensors take a central place due to a number of advantages that they offer over other optical sensors. The key advantages of these sensors are their inherent signal stability and suitability for multiplexing. Bragg gratings are not sensitive on source power changes since the detection is based on changes of spectral transmission or grating reflection.

Intensity-based fibre optical sensors represent one of the earliest and basic types of optical sensors that have been used for structural integrity monitoring /17/. They are attractive due to easy signal interpretation through the optical fibre. Much of the papers are based on the philosophy of optical fibre fracture, although monitoring of small changes in light intensity (*microbend* sensors) exhibited some success /18/.

The ability of interferometric based optical fibre sensors to measure strain was first demonstrated by Butter and Hocker /19/. These sensors rely on a change in the optical signal phase as a result of a change in the optical path length induced by an applied strain. This broad sensor category allows a very high resolution of measurement. Among various available interferometric sensors, Fabry-Perot sensors are the most widely used. Their use has been successfully demonstrated by various researchers /20,21/ which classify them as strong candidates for use in *smart* structural applications due to their quasi-point capability, high resolution and suitability for wide area sensing.

This paper focuses on applying intensity based fibre optic sensors in *smart* composite material development. Preliminary investigation made on laminar thermoplastic composite material aramid fibre/poly(vinyl butiral) /22/ has shown that this specific material has energy absorption capacity 5.5 times higher than the traditionally used materials with the same reinforcement, but mechanisms of its energy absorption had not been adequately explained which is a subject of investigation in this article. With this goal, intensity based FOS was embedded in the referred composite and the obtained *smart* structure was tested by indentation.

## SVOJSTVA KOMPOZITNOG MATERIJALA

Kao ojačanje je korišćena DuPont-ova aramidna tkanina poli (p-fenilenetereftalamid), zaštićenog imena Kevlar 129 površinske mase  $280 \text{ g/m}^2$ , gustine  $1,44 \text{ g/cm}^3$ , zatezne čvrstoće  $3380 \text{ MPa}$ , izduženja pri kidanju  $3,4\%$ , temperature dekompozicije  $560^\circ\text{C}$ . (Podaci dobijeni od proizvođača).

Za matricu su korišćene folije poli(vinilbutirala), (PVB) zaštićenog imena Saflex<sup>®</sup>, proizvođača *Monsanto Company*. Svojstva termoplastičnog PVB su: gustina  $1,058 \text{ g/cm}^3$ , zatezna čvrstoća  $23 \text{ MPa}$ , izduženje pri kidanju  $210\%$ , modul elastičnosti  $5 \text{ MPa}$ , Poasonov koeficijent  $\pm 0,5$ , temperatura staklastog prelaza  $16^\circ\text{C}$ , tvrdoća po Šoru "A"  $64$ . (Podaci dobijeni od proizvođača).

Kao senzori za ugradnju korišćena su multimodna optička vlakna. Svojstva optičkih vlakana su: prečnik jezgra  $62,5 \mu\text{m}$ , prečnik omotača  $125 \mu\text{m}$ , prečnik primarne zaštite  $250 \mu\text{m}$ , opseg radnih talasnih dužina  $850\text{--}1300 \text{ nm}$ , propusni opseg  $522\text{--}748 \text{ MHz/km}$ , numerička apertura  $0,27$ . (Podaci dobijeni od proizvođača *Iskra Opto-elektronika*).

Od definisanih komponenata napravljen je laminarni kompozitni materijal toplim presovanjem, /22/. Udeo komponenata u dobijenom kompozitu je dat u tab. 1. U poslednji sloj kompozitnog materijala ugrađena su optička vlakna prema razvijenom postupku, /23/. Mehanička svojstva višeslojnog kompozita su prikazana u tab. 2.

## COMPOSITE MATERIAL PROPERTIES

Aramid fabric poly(p-phenyleneterephthalamide) under registered trademark Kevlar 129 produced by DuPont was used as reinforcement. Properties are superficial mass of  $280 \text{ g/m}^2$ , density  $1.44 \text{ g/cm}^3$ , tensile strength  $3380 \text{ MPa}$ , elongation at break point  $3.4\%$ , decomposition temperature  $560^\circ\text{C}$ . (Data obtained from manufacturer).

Thin poly(vinyl butyral) (PVB) foils registered trademark Saflex<sup>®</sup> produced by *Monsanto Company* were used as the matrix. Thermoplastic PVB properties: density  $1.058 \text{ g/cm}^3$ , tensile strength  $23 \text{ MPa}$ , elongation at break  $210\%$ , tensile modulus  $5 \text{ MPa}$ , Poisson's ratio  $\pm 0.5$ , glass transition temperature  $16^\circ\text{C}$  and Shore "A" hardness  $64$ . (Data obtained from manufacturer).

Multimode optical fibres were used as intrinsic embedded sensors. Properties of optical fibres are: diameter of core  $62.5 \mu\text{m}$ , diameter of cladding  $125 \mu\text{m}$ , diameter of coating  $250 \mu\text{m}$ , wavelength range  $850\text{--}1300 \text{ nm}$ , bandwidth  $522\text{--}748 \text{ MHz/km}$ , and numerical aperture  $0.27$ . (Data obtained from manufacturer *Iskra Opto-elektronika*).

Laminar composite material was made of defined components by hot-melt pressing, /22/. The percentage of components is listed in Table 1. Optical fibre sensors were embedded in the last layer of composite material according to the described procedure, /23/. Mechanical properties of produced laminar composite material are given in Table 2.

Tabela 1. Podaci o kompozitnom materijalu  
Table 1. Composite material data.

Uzorak	Ojačanje	Masa ojačanja	Konačna masa uzorka	Udeo ojačanja	Udeo matrice
Sample	Reinforcement	Reinforcement mass	Total sample mass	Reinforcement share	Matrix share
KOJA1	Aramidno vlakno Aramid fibre	150.0 g	230.0 g	65.2%	34.8%

Tabela 2. Mehanička svojstva kompozitnog materijala aramidno vlakno/PVB  
Table 2. Mechanical properties of composite material aramid fibre/PVB matrix.

Modul elastičnosti Elasticity modulus	$E_{11}$	MPa	14.99
	$E_{22}$		14.98
	$E_{33}$		450
Modul klizanja Shear modulus	$G_{12}$	MPa	400
	$G_{13}$		200
	$G_{23}$		200
Poasonov koeficijent Poisson's ratio	$\nu_{12}$		0.3
	$\nu_{13}$		0.2
	$\nu_{23}$		0.2
Gustina Density	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	0.21413

## REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA UTICAJA STATIČKOG OPTEREĆENJA NA KOMPOZIT

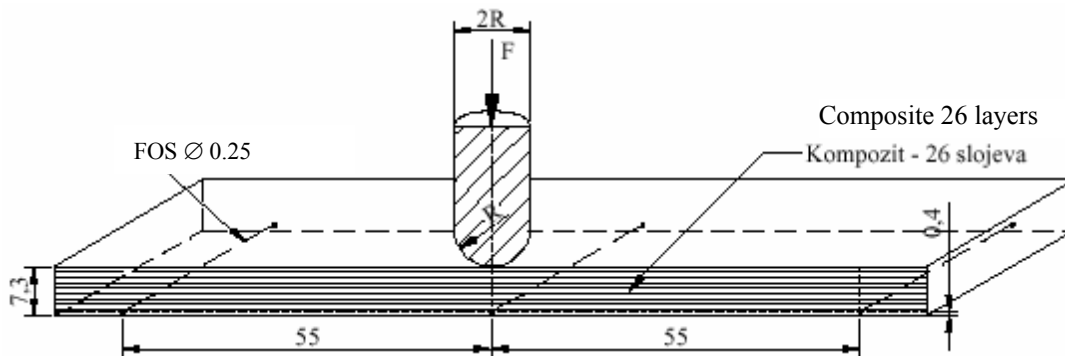
## Ispitivanje pomoću ugrađenih optičkih senzora

Predmet ispitivanja je da se utvrdi, preko fiberoptičkih senzora, nivo statičkog opterećenja pri kome se javlja inicijalni otkaz u višeslojnoj kompozitnoj ploči. Izrađeni uzorci termoplastičnih kompozitnih materijala su nakon ugrađivanja optičkih vlakana izloženi statičkom opterećenju na adaptiranoj kidalici. Optička vlakna su u poslednjem sloju u odnosu na opterećenja, koje deluje odozdo (sl. 1).

## TEST RESULTS AND DISCUSSION OF STATIC LOAD EFFECT ON COMPOSITE

## Testing by means of embedded fibre optic sensors

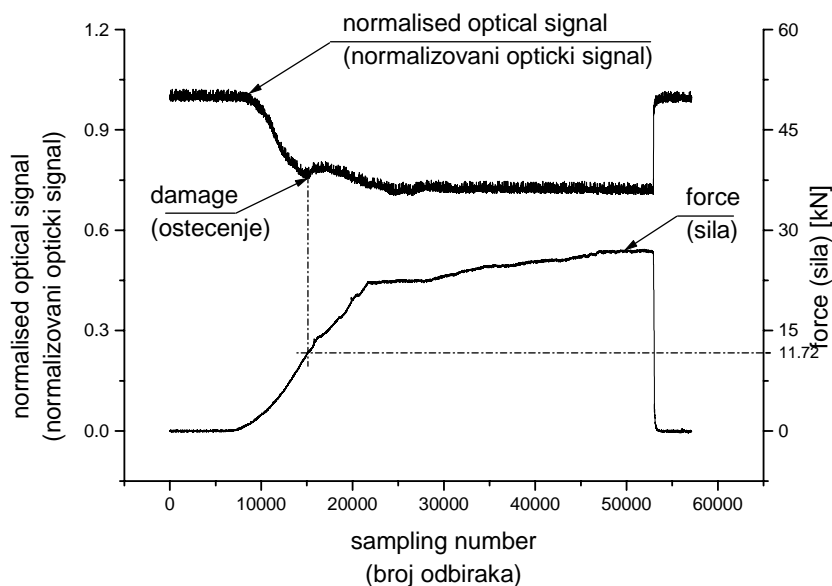
The purpose of testing was to determine, by using fibre optic sensors, a level of static loading which causes an initial failure in laminar composite material. Manufactured composite samples with optical fibres were subjected to static loading by the adapted tensile testing machine. Optical fibre loading was disposed in the farthest position of loading, acting at the bottom (Fig. 1).



Slika 1. Položaj utiskivača tokom ispitivanja  
Figure 1. Position of indenter during testing.

Rezultati dati na sl. 2 pokazuju promenu sa vremenom normalizovanog intenziteta svetlosnog signala kroz optičko vlakno 1, koje se nalazi tačno ispod mesta utiskivanja, kao i delujuće opterećenje u toku utiskivanja. Pad intenziteta signala je proporcionalan povećanju delujuće sile, odnosno porastu lokalnog naprezanja oko optičkog vlakna, sve do pojave minimuma normalizovanog optičkog signala. Pri vrednosti sile 11,72 kN, intenzitet signala raste što ukazuje na smanjenje lokalnog naprezanja. Ova pojava ukazuje da posle 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 intenzitet signala kroz optička vlakna ponovo 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 neoštećenu strukturu optičkih vlakana tokom testiranja. Maksimalna primenjena sila iznosi 27,50 kN.

Results, presented in Fig. 2 show the time dependence of the normalized light intensity signal through the optical fibre 1, placed exactly under the indentation point, as well as the applied load during indentation testing. Signal intensity drop is proportional to the applied load increase, e.g. to the increase of local stress around optical fibre, until the first local minimum in normalized optical signal has occurred. Hence, at force value of 11.72 kN intensity of signal increases indicating local stress decrease. This phenomenon shows that indenter, after piercing through the first layer of composite plate, ran into the thermoplastic matrix, e.g. the material of lower strength, reducing the stress around optical fibre. Signal intensity increases until the indenter touches the second layer of composite material, renewing stress increase around fibre and decrease of signal intensity through optical fibre. Applied force causes micro bending of optical fibre and change in its cross-section shape. After unloading, signal intensity restores its initial value which indicates undamaged structure of optical fibres during testing. Maximal value of applied force was 27.50 kN.



Slika 2. Promena intenziteta signala kroz optička vlakna tokom utiskivanja  
Figure 2. Signal intensity changes through optical fibre during indentation.

*Određivanje vertikalnog pomeranja utiskivača*

Opterećivanje uzorka je ostvareno na uređaju za određivanje pritiskne čvrstoće materijala. Za utiskivanje je korišćena kuglica prečnika 11.287 mm. Da bi otisak bio jasno vidljiv, kuglica je ogaravljena vrhom plamena. Prečnici otiska ( $d$ ) su izmereni mikrometarskim zavrtnjem i izračunate su dubina otiska ( $w$ ) i pritiska čvrstoća materijala (HB). Izračunati rezultati su dati u tab. 3.

Zavisnost promene vertikalnog pomeranja od uvedene sile data je na sl. 3. Ispod 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 linija na dijagramu menja nagib i za tačku H, koja je i poslednja tačka ispitivanja.

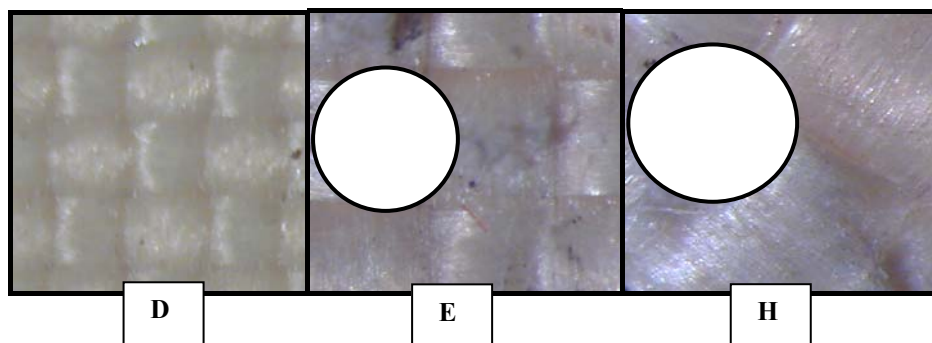
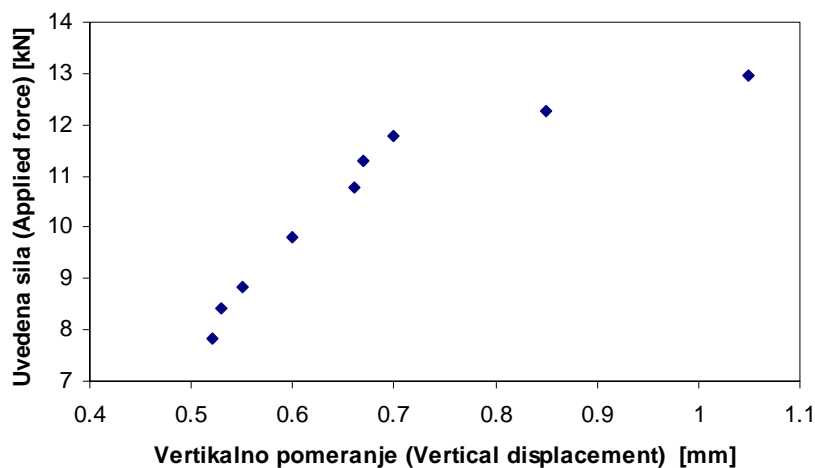
*Indentor vertical displacement determination*

Specimen indentation was performed on compression strength testing machine. As an indenter, the 11.287 mm diameter steel ball was used. Ball was blackened by flame before indentation in order to get clear indentation mark. Indentation mark diameters ( $d$ ) were measured by micrometer, and mark depth ( $w$ ) and compression strength (HB) were calculated. Calculated results are listed in Table 3.

Relationship between indenter vertical displacement and applied force is shown in Fig. 3. The microscope photographs for corresponding points are shown below the figure – point D for no detected initial damage of the first layer within material, point E where initial reinforcement failure occurs and changes the curve slope, and finally, point H which is the final point of testing.

Tabela 3. Eksperimentalno dobijeni i izračunati rezultati određivanja pritiskne čvrstoće materijala  
Table 3. Experimental and calculated results of compression strength determination.

Tačka	Opterećenje	Prečnik otiska	Dubina otiska	Sila	Pritisna čvrstoća
Point	Load	Mark diameter	Mark depth	Force	Compression strength
	kg	$d$ , mm	$w$ , mm	$F$ , daN	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



Slika 3. Zavisnost vertikalnog pomeranja i delujuće sile. Mikroskopski snimci karakterističnih tačaka utiskivanja  
Figure 3. Relationships indenter displacement vs. applied force. Micrographs of characteristic indentation points.

Dobijeni rezultati prikazuju naglu promenu nagiba krive nakon tačke E (sl. 3) pri delujućoj sili od 11,772 kN. Ovo ukazuje da se oštećenje u prvom sloju materijala dešava upravo pri pomenutoj vrednosti delujuće sile. Nagli porast vrednosti pomeranja se takođe javlja nakon pomenute vrednosti što potvrđuje pretpostavku da je došlo do popuštanja prvog sloja kompozitnog materijala i smanjenja otpornosti materijala u odnosu na delujuću silu.

#### ANALIZA KONTAKTNOG NAPONA KOMPOZITNOG PANELA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata je korišćena za analizu ponašanja kompozitnog panela pod statičkim opterećenjem /24,25/. Primarni cilj analize su raspodela napona i vertikalna pomeranja, deformacije kompozitnog panela pod dejstvom čeličnog utiskivača kao i određivanje koeficijenta inicijalnog otkaza FI (*Failure Index*). Koeficijent inicijalnog otkaza, koji definiše nivo opterećenja pri kome se javlja inicijalni lom nekog od slojeva u kompozitnim materijalima, detaljno je opisan u referencama /26,27/. U ovim analizama korišćen je Hoffmanov kriterijum inicijalnog loma za 3D stanje napona. Na sl. 4 prikazan je model konačnih elemenata kompozitne ploče sa utiskivačem kao modelom metka. Uvećana mreža modela konačnih elemenata u zoni kontakta je data na sl. 5. Kompozitna ploča modelirana 3D konačnim elementima da bi se dobili isti uslovi kao u eksperimentu gde je ploča bila postavljena na krutu podlogu. Takva analiza nije moguća sa 2D konačnim elementima višeslojnih kompozitnih ljuski.

Analiziran je segment kompozitne ploče i to kružni isečak (sl. 4) od 15 stepeni, dužine 18,5 mm i debljine 7,3 mm, potpuno oslonjen na ravnu krutu podlogu, koji je pritisnut čeličnim poluloptastim pritiskivačem prečnika 11.287 mm.

Za određene mehaničke karakteristike 3D ortotropnog kompozitnog materijala, oslonjenog na ravnu krutu podlogu i različite nivoe opterećenja, dobijeni su različiti naponi u materijalu i vertikalna pomeranja čeličnog pritiskivača (dubina otiska).

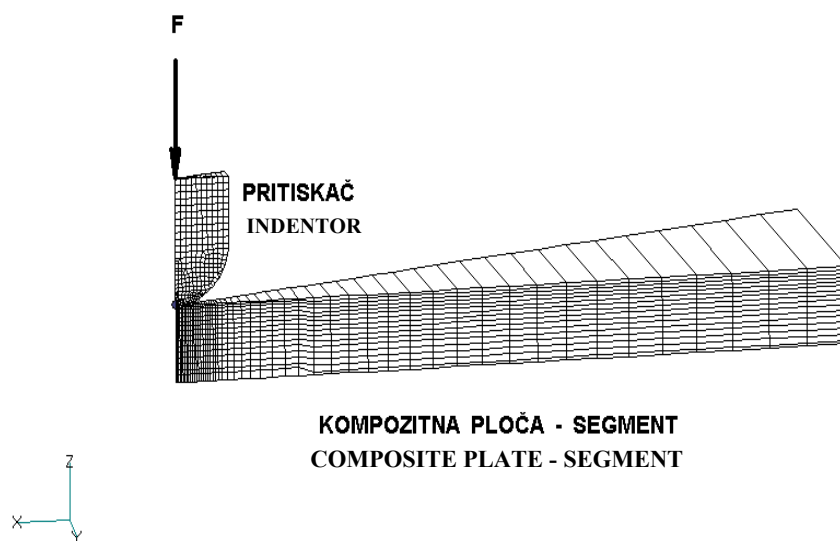
Obtained results show sharp change of curve slope after point E (Fig. 3), where the applied force is 11.772 kN. This slope change indicates that the first layer failure happens at mentioned value of applied force. Sudden increase in indenter displacement values is also a consequence of the assumed first layer failure within composite material reinforcement and decrease of material resistance for specific value of applied force.

#### THE COMPOSITE PLATE CONTACT STRESS ANALYSIS BY FINITE ELEMENT METHOD

Finite element method was used for analysis of composite panel behaviour under static loading /24,25/. The primary goal of the analysis are stress and vertical displacement distributions, deformation of the laminated plate under action of steel indenter, as well as determination of initial failure coefficient FI (*Failure Index*). Initial failure coefficient, defined as a static loading level which causes initial failure within the layers of composite materials, is described in more detail in Ref. /26,27/. In this analysis Hoffman's initial failure criterion was used for 3D stress state. Figure 4 shows the finite element model of composite plate with indenter as a projectile model. Figure 5 shows magnified finite element model mesh in the contact zone. Composite plate was modelled by 3D finite elements in order to achieve the same conditions during physical experiment when plate was laid upon rigid surface during testing. This analysis is not possible with 2D finite elements of multilayered composite shells.

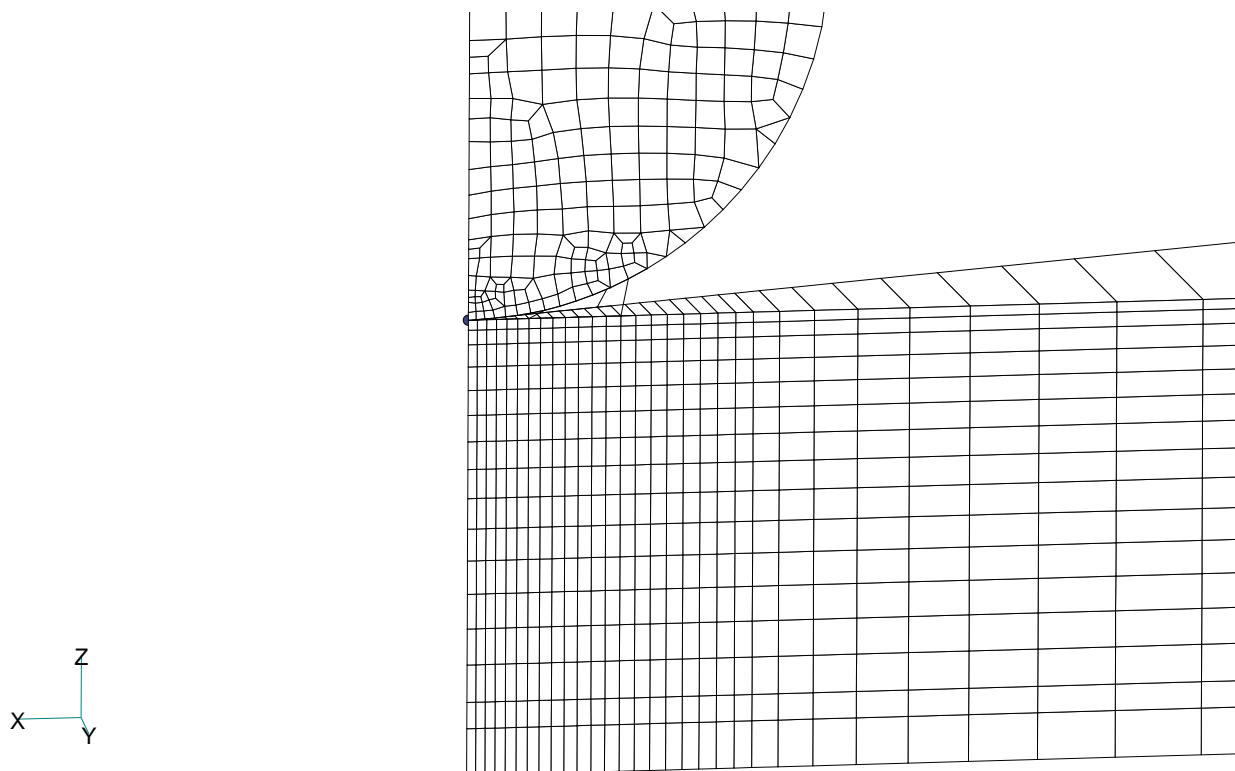
Analysis was performed on the 15 degree circular segment of composite plate (Fig. 4) of 18.5 mm in length and 7.3 mm in thickness, placed on the horizontal rigid surface, pressed with hemispherical hardened steel indenter of 11.287 mm in diameter.

For specific mechanical properties of 3D orthotropic composite material laid on plane rigid surface, and for different loading levels, different values of stresses in materials and the steel indenter vertical displacement (mark depths) were obtained.



Slika 4. Model konačnih elemenata segmenta kompozitne ploče  
Figure 4. Finite element model of composite plate segment.

V1  
L2  
C1  
G1



Slika 5. Mreža modela konačnih elemenata u zoni kontakta  
Figure 5. Mesh of finite elements in the contact zone.

Model konačnih elemenata je razvijen za segment pojednostavljenija, a dobijeni rezultati odgovaraju kompletnoj kompozitnoj ploči, korišćenoj u eksperimentu.

Utiskivač je od izotropnog materijala vrlo velike krutosti i njegova mehanička svojstva su data u tab. 4.

Tabela 4. Mehanička svojstva materijala utiskivača

Modul elastičnosti	$E$	MPa	50
Modul smicanja	$G$	MPa	19.38
Poasonov koeficijent	$\nu$		0.29
Gustina	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	7820

Kompozitni materijal je višeslojna ploča dimenzija 142×157×7,3 mm i sastoji se od 26 slojeva aramidne tkanine u matrici od PVB. U MKE analizi višeslojni materijal je zamenjen analognim 3D kompozitnim materijalom, sa izmerenim određenim mehaničkim karakteristikama za 3D epruvetu, isečenu iz kompozitne ploče (tab. 2). Analiza konstrukcije metodom konačnih elemenata izvršena je na računaru, softverom MSC/NASTRAN.

Na sl. 6–10 prikazana je raspodela napona i deformacija na modelu konačnih elemenata kompozitne ploče, za slučaj pritisne sile  $F_{uk} = 1177,2$  daN (sila na segmentu  $F = 49$  daN). U tab. 5 i 6 i na sl. 9 i 10 uporedno su prikazani rezultati dobijeni eksperimentalno i metodom MKE.

Za različite vrednosti pritisne sile  $F$  dobijene su odgovarajuće dubine otisaka pritiskivača,  $w$ , i sračunata je pritisna čvrstoća HB. Na sl. 3 prikazano je vertikalno pomeranje (dubina otiska),  $w$  (mm), u zavisnosti od pritisne sile,  $F$  (daN), dobijeno eksperimentom.

For simplification, finite element model was created for segment, and the obtained results correspond to the whole composite used in the experiment.

The indenter was made of very stiff isotropic material and its mechanical properties are given in Table 4.

Table 4. Mechanical properties of indenter material.

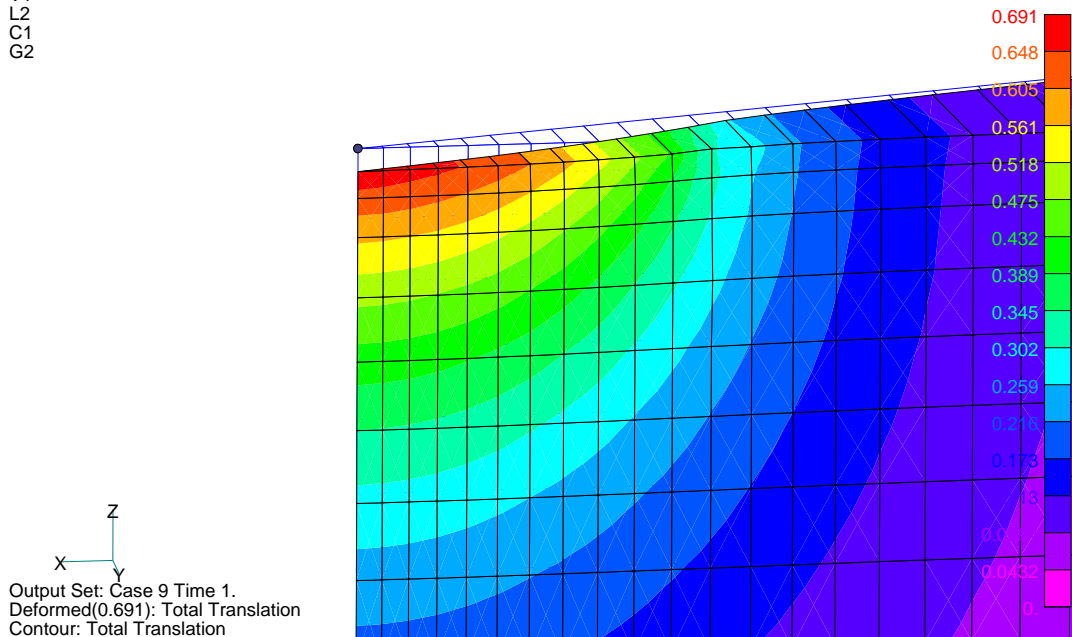
Modulus of Elasticity	$E$	MPa	50
Shear Modulus	$G$	MPa	19.38
Poisson's ratio	$\nu$		0.29
Density	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	7820

Composite material is a laminar plate 142×157×7.3 mm in size which consists of 26 aramid fabric layers within the PVB matrix. In FEM analysis, multi-layered material is replaced with analogue 3D composite material which includes measured mechanical properties for 3D sample, cut from composite plate (Table 2). Finite element structural analysis was performed on computer with the MSC/NASTRAN software.

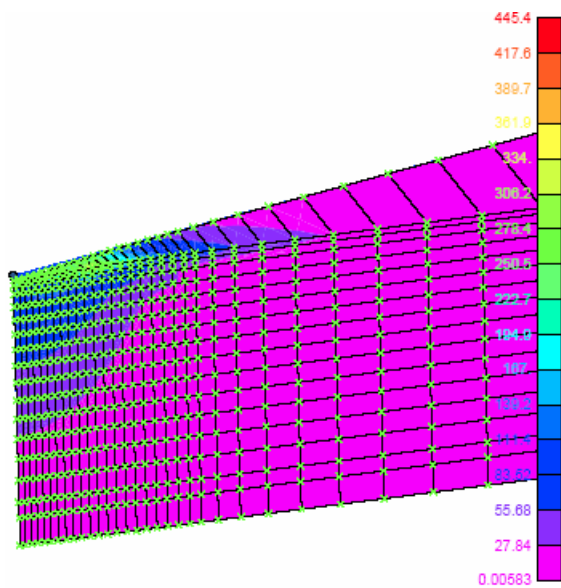
Figures 6–10 show stress/strain distribution on the finite element composite plate model for compression force value of  $F_{uk} = 1177.2$  daN (force on segment  $F = 49$  daN). In Tables 5 and 6 and Figs. 9 and 10, the experimental and calculated FEM results are compared.

Different values of compression force  $F$  produced corresponding indenter depths,  $w$ , and calculated compression strength HB. Figure 3 shows experimental results of vertical displacement (mark depth),  $w$  (mm), as dependent on compression force,  $F$  (daN).

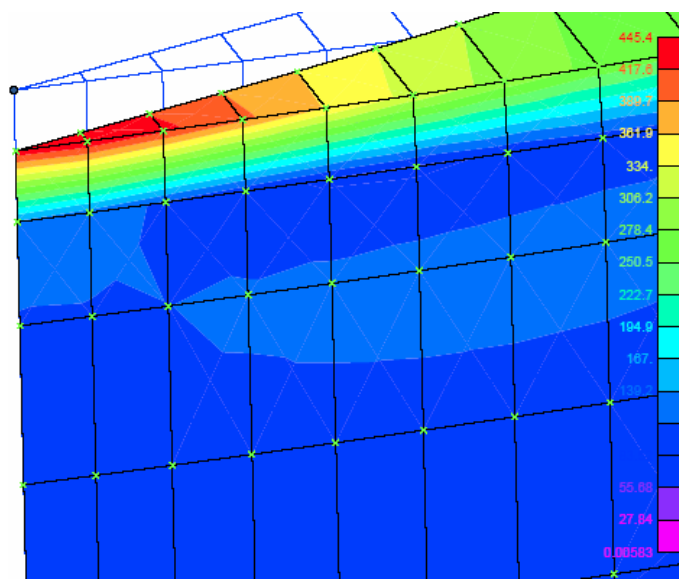
V1  
L2  
C1  
G2



Slika 6. Raspodela pomeranja u zoni kontakta – dubina prodiranja pritiskivača u kompozitnu ploču, uvećano  
Figure 6. Distribution of displacement (mm) in contact zone – indentation mark depth, magnified.



Slika 7. Raspodela napona u zoni kontakta  
Figure 7. Stress distribution in contact zone.



Slika 8. Raspodela napona u zoni kontakta deformisano stanje, uvećano  
Figure 8. Stress distribution in contact zone, magnified.

Tabela 5. Vertikalno pomeranje u zavisnosti od pritisne sile. Poređenje eksperiment – MKE  
Table 5. Displacement-compression force relationship obtained by experiment and FEM.

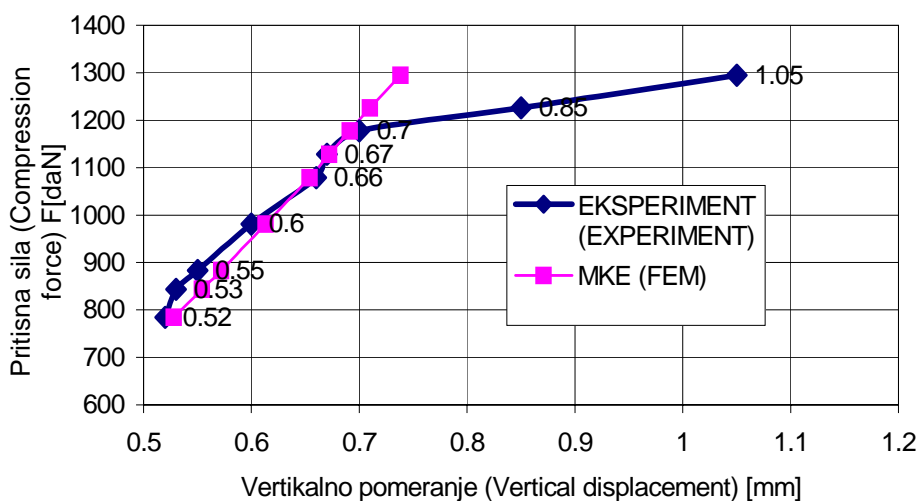
Tačka Point	Pritisna sila Compression force $F_c$ , daN	Dubina otiska - eksperiment Mark depth - experiment $w$ , mm	Vertikalno pomeranje-MKE Vertical displacement-FEM $w$ , mm
A	784.8	0.52	0.528
I	843.7	0.53	0.554
B	882.9	0.55	0.572
C	981.1	0.60	0.613
D	1079.1	0.66	0.654
G	1128.1	0.67	0.672
E	<b>1177.2 (<math>F_I</math>)</b>	<b>0.70</b>	<b>0.691</b>
F	1226.2	0.85	0.710
H	1294.9	1.05	0.738



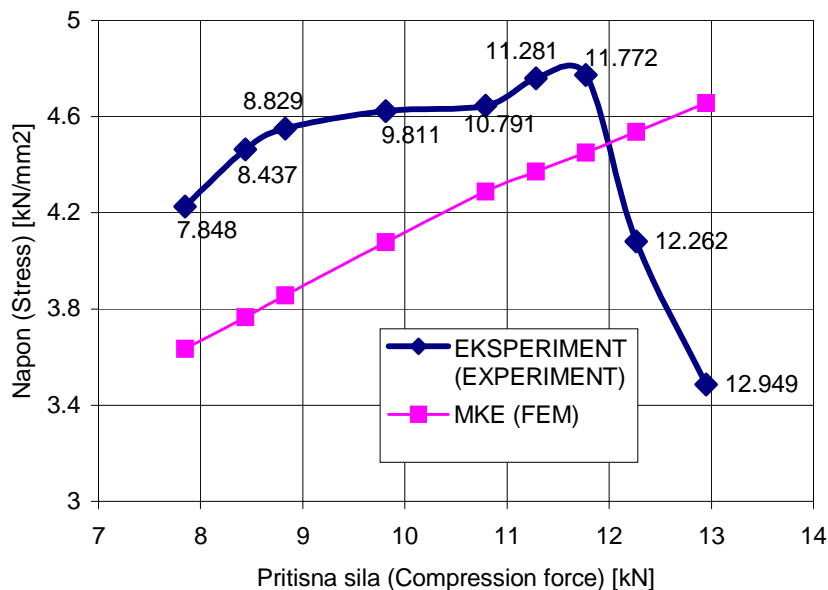
Tabela 6. Pritisna čvrstoća – uporedni pregled eksperimentalnih rezultata i proračuna MKE  
 Table 6. Compression strength – compared experiment and FEM.

Tačka Point	Pritisna sila Compression force kN	Pritisna čvrstoća Compression strength kN/mm <sup>2</sup>	Ekvivalentni napon von Mises–MKE Equivalent stress von Mises–FEM kN/mm <sup>2</sup>
A	7.848	4.226	3.635
I	8.437	4.464	3.766
B	8.829	4.550	3.857
C	9.811	4.623	4.078
D	10.791	4.645	4.288
G	11.281	4.760	4.371
E	11.772	4.773	4.450
F	12.262	4.081	4.537
H	12.949	3.486	4.657

Vertikalno pomeranje u zavisnosti od pritisne sile - uporedni dijagram (Compared displacement - compression force diagram of experimental and FEM simulated results)



Slika 9. Uporedni dijagrami eksperimentalnih rezultata i proračuna za zavisnost vertikalno pomeranje–pritisna sila  
 Figure 9. Comparative diagrams of experimental and calculated results of relation displacement vs. compression force.



Slika 10. Uporedni dijagrami eksperimentalnih rezultata i proračuna naponskih stanja u zavisnosti od pritisne sile  
 Figure 10. Comparative diagrams of experimental and calculated results of relation stress state vs. compression force.

Na dijagramu se uočava karakteristična tačka E: sila  $F_f = 1177,2$  daN, dubina otiska – ugib  $w = 0,7$  mm. U ovoj tački došlo je do otkaza – loma prvog sloja kompozitnog materijala ploče. Daljim porastom sile  $F$  ugib  $w$  drastično raste (tačke F i H u tab. 3, sl. 3). Na sl. 6 prikazani su rezultati MKE analize. Nivo pritisne sile  $F$  isti je kao u eksperimentu. Dobijeni rezultati MKE prikazani su uporedo sa eksperimentalnim rezultatima na sl. 9 i u tab. 5.

Uočava se dobro poklapanje MKE rezultata sa eksperimentom za vertikalno pomeranje – ugib u zoni do tačke E ( $F = 1177,2$  daN). Poklapanje je na nivou 1–3%. Analiza MKE u zoni nakon tačke E je bespredmetna, jer je došlo do otkaza prvog sloja – lamine kompozita.

U tab. 6 i na sl. 10 su upoređeni numerički i eksperimentalni rezultati raspodele naponskih stanja gde se uočava odstupanje od 6–15%. Kako su eksperimentalni rezultati posredno računati i kako je kompozitna konstrukcija kompleksna, ovo odstupanje je očekivano.

Dobro slaganje nivoa opterećenja pri kome se javlja inicijalni lom ( $F_f$ ) registrovan fiberoptičkim senzorima (sl. 2) sa rezultatima MKE (tab. 5) ukazuje da se numerička MKE simulacija može koristiti za “normiranje” senzora.

#### ZAKLJUČAK

Ispitivani su termoplastični balistički kompozitni materijali aramidno vlakno – PVB sa ugrađenim optičkim vlaknima. Optička vlakna su ugrađena kao intenzitetni senzori za detekciju mehaničkih oštećenja i deformacija u realnom vremenu. Radi toga 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 tokom izrade i 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.

U cilju analize ponašanja kompozita pod statičkim opterećenjem izvedena je MKE numerička simulacija sistema kompozitna ploča/utiskivač. Primarni cilj numeričke simulacije su precizno određivanje vertikalnih pomeranja i naponskih stanja u kompozitnoj ploči pod dejstvom opterećenja utiskivača, kao i utvrđivanje nivoa opterećenja pri kome se javlja inicijalni otkaz. Namera je da utiskivač preuzme ulogu modela metka. Da bi se adekvatno opisalo ponašanje kompozitne ploče pod statičkim opterećenjem: sistem je modeliran kao kontaktni problem.

Drugi cilj analize je određivanje raspodele pomeranje–deformacija kompozitnog panela u zoni senzora kao i da se uspostavi zavisnost između električnog signala u optičkom vlaknu i deformacije kompozitne ploče u zoni senzora.

Bitan pokazatelj za uspostavljanje ovih zavisnosti je nivo opterećenja inicijalnog loma u kompozitnom panelu na mestu kontakta utiskivača. Numerički su određena vertikalna pomeranja po debljini panela sa povećavanjem opterećenja. Za verifikaciju tačnosti rezultata merena su pomeranja utiskivača za različite nivoe opterećenja.

There is a characteristic point E on diagram: the force  $F_f = 1177.2$  daN, mark depth  $w = 0.7$  mm. In this point initial failure occurred – failure of the first layer of plate composite material. With further increase of force  $F$ , depth  $w$  increases fast (points F and H, Table 3 and Fig. 3). Figure 6 shows results of FEM analysis. The applied force level  $F$  is the same as in the experiment. Obtained FEM results are compared with experimental results in Fig. 9 and Table 5.

Good agreement is noticed between FEM results and experiment for vertical displacement–deflection in zone up to E ( $F = 1177.2$  daN). Agreement is in the range 1–3%. The FME analysis in the zone beyond point E is pointless, since failure of first layer – composite laminae occurred.

In Table 6 and Fig. 10 numerical and experimental results of stress state distribution are compared with noticeable deviation of 6–15%. Since experimental results are calculated indirectly and the composite construction is complex, this deviation is expected.

Good agreement in initial failure loading level ( $F_f$ ), detected by fibre optic sensors (Fig. 2), with FEM results (Table 5) indicates that numerical FEM simulation can be used for sensor “normalization.”

#### CONCLUSION

Thermoplastic ballistic composite materials aramid fibre – PVB with embedded optical fibres are investigated. Optical fibres were embedded as intensity sensors for detection of mechanical damage and deformations in real time. Hence, the signal light intensity drop was monitored as an optical fibre response to the applied static loading. The expected result of this investigation is the development of a system for monitoring changes in the thermoplastic laminar composite structure during composite processing and behaviour in real service condition.

Experiments showed that signal intensity drop through optical fibres occurs when the stress material is transferred through into them. Embedded optical fibres are an efficient way to estimate what is happening within thermoplastic composite material when it is subjected to static loading.

For further analysis of composite behaviour subjected to static loading, a FEM numeric simulation composite plate/indenter is performed. The primary goal of numeric simulation is precise determination of vertical displacement and stress state within composite plate caused by indenter load, and determining the critical loading level when initial failure occurs. Indenter was used as a replacement for the projectile. In order to adequately describe composite plate behaviour under static loading, the system was modelled as a contact problem.

Another goal of the analysis was to determine displacement–strain distribution of composite plate in the sensor zone, and to set the relation between electrical signal in optical fibre and deformation of composite plate in sensor zone.

Substantial indicator for setting those relations is loading level at failure initiation in composite plate at indenter contact point. Vertical displacement over whole plate thickness was numerically determined with increased loading. For the verification of obtained result accuracy, indenter displacement was measured for different loading levels.

Poređenje rezultata pokazuje izuzetno dobru saglasnost između proračuna i eksperimenta, sa odstupanjem od 1–3% sve 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 jer u numeričkoj analizi nije smanjena krutost oštećenog sloja, pojave koja nije od interesa za ovo istraživanje.

Vrednost opterećenja inicijalnog otkaza određena MKE analizom je  $F = 11.77$  kN. Zbog zanemarljivog odstupanja eksperimentalnih i numeričkih rezultata pre dostizanja ove vrednosti numeričke analize na bazi MKE, može se smatrati da je numerička analiza valjana za definisanje pomeranja i deformacija u celom kompozitnom panelu, uključujući i zonu ugrađenog fiberoptičkog senzora, što je i primarni cilj uvođenja numeričke analize u istraživanje.

S druge strane, merenje pada intenziteta optičkog signala, iskazano preko pada napona na fotodetektoru, pokazuje da se isti javlja pri sličnoj vrednosti opterećenja  $F = 11.72$  kN, što potvrđuje postojanje “komunikacije” između senzora i oštećenja kompozitne ploče.

Rezultati prikazani u ovom radu potvrdili su mogućnost upotrebe optičkih vlakana kao intenzitetnih senzora promena u strukturi termoplastičnih višeslojnih kompozitnih materijala aramidno-PVB u realnom vremenu, pod dejstvom statičkog opterećenja.

#### LITERATURA – REFERENCES

- Grattan KTV, Meggitt BT (eds), *Devices and Technology, Optical fiber sensor technology 2*, 1998, Chapman and Hall.
- Kersey AD, *A review of recent developments in fiber optic sensor technology*, Opt. Fiber Technol.: Mater., Devices Syst. 1996, 2, 291–317.
- LeBlanc M, Measure RM, *Impact damage assessment in composite materials with embedded fiber-optic sensors*, Composites Engineering 1992, 2, 573–596.
- Measures RM, Glossop NDW, Lymer J, LeBlanc M, Dubois S, Tsaw W, Tennyson RC, *Structurally integrated fiber optic damage assessment system for composite materials*, Appl. Opt. 1989, 28, 2626–2633.
- Martin AR, Fernando GF, Hale KF, *Impact damage detection in filament wound tubes using embedded optical fiber sensors*, Smart Mater. Struct. 1997, 6, 470–476.
- Chang CC, Sirkis JS, *Design of fiber optic sensor systems for low velocity impact detection*, Smart Mater. Struct. 1998, 7, 166–177.
- Elvin N, Leung C, *Feasibility study of delamination detection with embedded optical fibers*, J. Intell. Mater. Syst. Struct. 1997, 8, 824–828.
- Rowe WJ, Rausch EO, Dean PD, *Embedded optical fiber strain sensor for composite structure applications*, SPIE 1986, 718, 266–273.
- Everall L, Gallon A, Roberts D, *Optical fiber strain sensing for practical structural load monitoring*, Sensor Review 2000, 20, 113–119.
- McKenzie I, Jones R, Marshall IH, Galea S, *Optical fiber sensors for health-monitoring of bonded repair systems*, Compos. Struct. 2000, 50, 405–416.
- Chiu WK, Koh YL, Galea SC, Rajic N, *Smart structure application in bonded repairs*, Compos. Struct. 2000, 50, 433–444.
- Findik F, Mrad N, Johnston A, *Strain monitoring in composite patched structures*, Compos. Struct. 2000, 49, 331–338.
- Okabe Y, Yashiro S, Kosaka T, Takeda N, *Detection of transverse cracks in CFRP composites using embedded fiber Bragg grating sensors*, Smart Mater. Struct. 2000, 9, 832–838.
- Takeda N, Kosaka T, Ichiyama T, *Detection of transverse cracks by embedded plastic optical fiber in FRP laminates*, SPIE 1999, 3670, 248–255.
- Badcock RA, Fernando GF, *An intensity-based optical fiber sensor for fatigue damage detection in advanced fiber-reinforced composites*, Smart Mater. Struct. 1995, 4, 223–230.
- Lee DC, Lee JJ, Kwon IB, Seo DC, *Monitoring of fatigue damage of composite structures by using embedded intensity-based optical fiber sensors*, Smart Mater. Struct. 2001, 10, 285–292.
- Hale KF, Hockenull BS, Christodoulou G, *The application of optical fibers as witness devices for the detection of plastic strain and cracking*, Strain 1980, 16, 150–154.
- Lagakos N, Cole JH, Bucaro JA, *Microbend fiberoptic sensor*, Appl. Opt. 1987, 26, 2171–2180.
- Butter CD, Hocker GB, *Fiber optics strain gauge*, Appl. Opt. 1978, 17, 2867–2869.
- Lee CE, Alcoz JJ, Yeh Y, Gibler WN, Atkins RA, Taylor HF, *Optical fiber Fabry-Perot sensors for smart structures*, Smart Mater. Struct. 1992, 1, 123–127.
- Liu T, Wu M, Rao Y, Jackson DA, Fernando GF, *A multiplexed optical fiber-based extrinsic Fabry-Perot sensor system for in-situ strain monitoring in composites*, Smart Mater. Struct. 1998, 7, 550–556.
- Živković I, Perišić P, Burzić Z, Uskoković P, Aleksić R, *Aramid fiber reinforced laminar thermoplastic composite materials*, Journal of Advanced Materials, in press
- Živković I, Brajović Lj, Uskoković P, Aleksić R, *Indentation damage detection in thermoplastic composite laminates by using embedded optical fibers*, Journal of Advanced Materials, in press

24. Maksimović S, *Optimum Design of Composite Structures by Finite Elements*, Mechanical Behaviour of Composites and Laminates, Eds W.A. Green, M. Mićunović, Elsevier Applied Science 1987, London.
25. Maksimović S, *Some Computational and Experimental Aspects of the Optimal Design Process of Composite Structures*, Journal of Composite Structures, 1990, Vol. 16
26. Maksimović S, *Improved geometrically nonlinear finite element analysis and failure fibre reinforced composite laminates*, Proc. of Fourth Int. Symp. on Brittle Matrix Composites, Warsaw, Poland, Woodhead Publ. Lim. Cambridge (1994).
27. Maksimović S, Ružić D, Maksimović K, *An improved 4-node shell finite element used in postbuckling and failure analysis*, LUXFEM – 1<sup>st</sup> International Conference on Finite Element for Process, Luxemburg, Luxemburg City, (2003), pp.13-14.