

VANJA MALIŠIĆ¹, DRAGOLJUB ILIĆ², DRAGOLJUB BEKRIĆ³, MARINA STAMENOVIĆ⁴, SLAVIŠA PUTIĆ^{1*}

¹Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija, ²Vazduhoplovna akademija, Beograd, Srbija, ³Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija, ⁴VŠSS Beogradska Politehnika, Beograd, Srbija

Naučni rad
ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585
UDC:620.178.2:666.1-033.5
doi:10.5937/ZasMat1504421M



Zastita Materijala 56 (4)
421 - 428 (2015)

Mikromehanička analiza loma laminatnog staklo-epoksi kompozitnog materijala ispitivanog na zatezanje

IZVOD

Predmet i cilj ovog rada je određivanje statičkih zateznih svojstava staklo-epoksi polimernog kompozitnog materijala. Ispitivani materijal je kompozitni materijal stakleno platno 280 g/m², "twill tkanje" širine 100 cm, tip - Interglas 92125 i epoksi smola tip MGS L-135, a uzorci su oblikovani ručnom metodom sa 35% zapreminskog udela vlakana. Ispitivane su orijentacije 0/90° i ±45°. Određeni su zatezna čvrstoća i modul elastičnosti prema odgovarajućim standardnim ispitivanjima. Pored izvedene analize dobijenih rezultata, a na osnovu izgleda prelomnih površina uzoraka izvedena je i mikromehanička analiza nastanka i razvoja oštećenja pri zatezanju čime su potvrđeni svi mehanizmi i oštećenja karakteristični za ovakvu vrstu materijala i ispitivanja. Mikromehaničkom analizom na prelomnim površinama ispitivanih uzoraka se došlo do strukture koja je povoljnija u eksploataciji pri ovakvog tipu spoljašnjeg opterećenja.

Ključne reči: mikromehanička analiza, staklo-epoksi kompozitni materijali, zatezna svojstva staklo-epoksi kompozitnog materijala, ispitivanje na zatezanje staklo-epoksi kompozitnog materijala.

1. UVOD

Mehanička svojstva kompozitnih materijala (kao heterogenih, anizotropnih materijala), formiraju se u toku samog procesa njegove proizvodnje. Pošto svojstva kompozitnih materijala kao takva nisu stabilna nego su zavisna od reproduktivnosti procesa proizvodnje, mehanička ispitivanja time još više dobijaju na značaju [1,2]. Za vreme trajanja procesa oblikovanja kompozitnog materijala potrebno je održavati neke od veličina (kao što su pritisak, temperatura i vreme) u uslovima predhodno postavljenih ograničenja. Međutim, baš u toku procesa oblikovanja može doći do poremećaja predhodno navedenih parametara koji mogu prozurokovati niz nepravilnosti, kao što je stvaranje mehurova (šupljina), povećane vlažnosti, povećanog pritiska u kalupu i sl. Sve te nepravilnosti mogu dovesti do odstupanja stvarnih mehaničkih svojstava od onih dobijenih teorijskom analizom i proračunima [3,4]. To zahteva naknadnu proveru tih svojstava izborom nekih od standardnih metoda

metoda statičkih i dinamičkih ispitivanja radi dobijanja relevantnih podataka neophodnih za klasifikaciju, kao i za kasniju statističku obradu rezultata [5]. Navedena ispitivanja, uz ispitivanje fizičkih, termičkih i mehaničkih svojstava kompozitnih materijala u celini daju kompletnu sliku o kompozitu.

Oštećenje u kompozitnim materijalima koje nastaje kao posledica delovanja zateznog opterećenja je predmet brojnih naučnih radova. Razvijen je veliki broj metoda sa ili bez razaranja za utvrđivanje nastanka i razvoja oštećenja u njima [6]. Ispitivanja se ne izvode samo radi utvrđivanja svojstava prilikom proizvodnje, ili prijema, već vrlo često i radi raznih ekspertiza u svrhu utvrđivanja načina upotrebe i odgovornosti koja nastaje usled necelishodne upotrebe [7]. U razvojnim centrima većih industrijskih preduzeća i naučnoistraživačkim institutima, ispitivanja se vrše u cilju što potpunijeg upoznavanja svojstava kompozitnog materijala, kao i u cilju poboljšanja tih svojstava kako bi se dobili materijali za nove proizvode, odnosno nova područja primene. Podaci dobijeni ispitivanjem pogodno ocenjuju različita svojstva materijala i kasnije mogu biti iskorišćeni za analizu i eventualnu realizaciju konstrukcije od ispitivanog materijala [8,9].

Ispitivanje na zatezanje je najčešće mehaničko ispitivanje i ima vrlo široku primenu. Izvodi se radi dobijanja modula elastičnosti, zatezne čvrstoće i Poasonovog koeficijenta odnosno radi dobijanja

*Autor za korespondenciju: Slaviša Putić

E-mail: slavisa@tmg.bg.ac.rs

Rad primljen: 17. 06. 2015.

Rad prihvaćen: 19. 08. 2015.

Rad je dostupan na sajtu: www.idk.org.rs/casopis

njegovih relevantnih zateznih svojstava [10]. Pri ispitivanjima se uglavnom koriste glatke epruvete koje se iz oblikovanih ploča seku reznim alatom. Tokom ispitivanja kontinualno se registruju veličina opterećenja i odgovarajuće uzdužne i poprečne deformacije. Kao uređaji za ispitivanje se koriste kidalice sa čeljustima, koje se mogu razdvajati različitim brzinama (1-500 mm/min) u zavisnosti od vrste i strukture materijala koji se ispituje. Kidalica mora kontinualno da registruje opterećenje epruvete pri zatezanju sve do njenog kidanja. Uređaj mora da poseduje i pogodan instrument za pokazivanje izduženja epruvete u zavisnosti od opterećenja u bilo kom trenutku ispitivanja. Tokom postupka ispitivanja na zatezanje bi mogao da se predstavi na sledeći način [11]:

- Izmeri se širina i debljina epruvete sa tačnošću 0,05 mm;
- Epruveta se postavi u čeljusti kidalice pri čemu se mora obratiti pažnja na veličinu sile stezanja koja mora da bude takva da epruveta pri ispitivanju ne klizi, ali i da se ne prelomi;
- Podesi se odgovarajuća brzina ispitivanja, a zatim se uključi mašina; i
- Kontinualno se registruju opterećenje i odgovarajuće deformacije.

Nakon sprovedenog prethodno opisanog postupka ispitivanja na zatezanje, na osnovu dobijenih podataka pre loma epruvete, konstruiše se kriva napon-deformacija (σ - ϵ), a na osnovu pravolinijskog dela krive se dobija uzdužni (longitudinalni) modul elastičnosti, E dok je na osnovu izgleda prelomnih površina uzorka na skening elektronskom mikroskopu (SEM) izvedena i mikromehanička analiza nastanka i razvoja oštećenja pri zatezanju čime su potvrđeni svi mehanizmi i oštećenja

2. STRUKTURA MATERIJALA

Struktura ispitivanog materijala je stakleno platno 280 g/m², "twill tkanje" širine 100 cm, tip - Interglas 92125 i epoksi smola tip MGS L-135, orijentacije vlakana $\pm 45^\circ$ i $0/90^\circ$. Ispitivani uzorci su oblikovani ručnom metodom sa 35% zapreminskog udele vlakana.

Fizička svojstva "E"-staklenih vlakana koja su korišćena u tkanju su prikazana u tabeli 1, dok je u tabeli 2 prikazan njihov hemijski sastav.

Utrošak smole je 220 g/m², debljina lamine je 0,308 mm. Ukupno je ugrađeno 8 slojeva ojačanja u panelu.

Sečenje uzoraka je izvedeno u preduzeću "WATERJET" iz Male Krsne. Mehanička ispitivanja su izvedena u laboratorijama Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu. Mikromehanička analiza je izvedena na SEM-u na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Koriš-

ćen je skening elektronski mikroskop (SEM) TESCAN Mira3 XMU na 5 kV. Prethodno su uzorci prevučeni slojem legure Au-Pd.

Tabela 1 - Svojstva "E"- staklenog vlakna

Svojstvo	Jedinice	Vrednost
Prečnik vlakna	μm	8-16
Masa po jedinici dužine	g/km	27,37
Gustina vlakna	kg/m ²	2540
Površinska masa (gramatura)	g/m ²	450 \pm 5%
Zatezna čvrstoća, R_m	[MPa]	2500-3450
Jungov modul elastičnosti, E_1	[GPa]	72,5
Deformacija, ϵ_1	[%]	3,3-3,5
Koeficijent toplotnog širenja	[10^{-6} K^{-1}]	5
Koeficijent toplotne provodljivosti	[W/m·K]	1
Dielektrična konstanta	[ξ]	6,7
Specifični električni otpor	[Ωcm]	10^{14}
Max. vreme kvašenja u smoli	s	20

Tabela 2 - Hemijski sastav "E"- staklenog vlakna

Hemijski sastav	Udeo (%)
Silicijum(IV)-oksid	52 - 56
Aluminijum(III)-oksid	12 - 16
Bor(III)-oksid	5 - 10
Natrijum(I)-oksid i kalijum(I)-oksid	0 - 2
Magnezijum(II)-oksid	0 - 5
Kalcijum(II)-oksid	16 - 25
Titanijum(IV)-oksid	0 - 1,5
Gvožđe(III)-oksid	0 - 0,8
Gvožđe	0 - 1

Svojstva smole su prikazana u tabelama 3 i 4.

Tabela 3 - Fizička svojstva umešane smole

Test	Jedinice	Vrednosti
Gustina na 25°C	g/cm ³	1,14-1,18
Viskoznost na 25°C	mPa·s	2300-2900
Epoksi ekvivalent	-	170-189
Epoksi vrednost	-	0,53-0,59

Tabela 4 - Mehanička svojstva umešane smole

Test	Jedinice	Vrednosti
Zatezna čvrstoća, R_m	MPa	68-80
Deformacija, ϵ	%	5-7
Savojna čvrstoća, R_f	MPa	110-130
Modul elastičnosti, E	MPa	2,9-3,2
Pritisna čvrstoća	MPa	110-130
Udarana žilavost /Charpy/, a_n	KJ/m ²	30-50

3. OZNAKE ISEČENIH UZORAKA I TOK ISPITIVANJA

Ispitivali su se uzorci (Z-SE) sečeni iz oblikovanih ploča radi određivanja napona i deformacija u uzdužnom pravcu ispitivanjem na zatezanje. Ispitivano je ukupno 6 uzoraka, po 3 uzorka



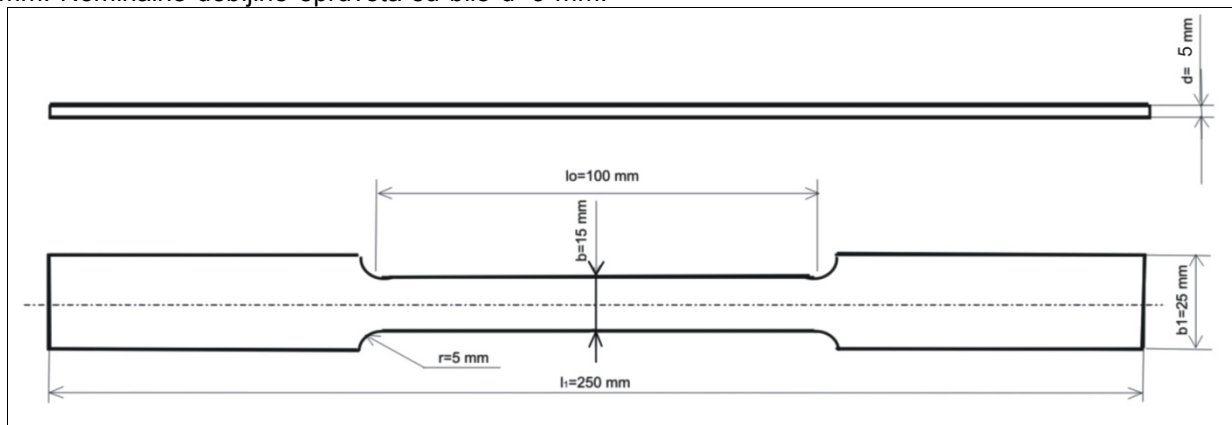
čija je orijentacija vlakana $\pm 45^\circ$ i po 3 uzorka čija je orijentacija vlakana $0/90^\circ$. Oznake uzoraka su Z-SE-1 $0/90^\circ$, Z-SE-2 $0/90^\circ$, Z-SE-3 $0/90^\circ$, Z-SE-1 $\pm 45^\circ$, Z-SE-2 $\pm 45^\circ$ i Z-SE-3 $\pm 45^\circ$. Određene su odgovarajuće zatezne čvrstoće i moduli elastičnosti. Izgled isečenih uzoraka prikazan je na slici 1.



Slika 1 - Izgled isečenih uzoraka korišćenih u ispitivanjima na zatezanje (levo-orijentacija vlakana $\pm 45^\circ$, desno- orijentacija vlakana $0/90^\circ$)

Uzorci (epruvete), (sl.2) su sečeni dimenzija dužine $l_1=250$ mm, širine $b_1=25$ mm, sa širinom mernog, središnjeg dela $b=15$ mm dužine $l_0=100$ mm. Nominalne debljine epruveta su bile $d=5$ mm.

Nakon sečenja uzoraka naknadno su izmerene i proverene dimenzije sa tačnošću $\pm 1\%$. Uzorci su prilagođeni standardu ASTM D 3039-83 [12].



Slika 2 - Dimenzije uzoraka (Z-SE) korišćenih u ispitivanjima na zatezanje

Ispitivanje je izvedeno na elektro-mehaničkoj kicalici INSTRON 1332 sa kontrolerom INSTRON FAST TRACK 80800, uz korišćenje hidrauličkih čeljusti. Podaci sa ispitivanja su se prikupljali preko višekanalnog mernog uređaja UPM 60. Način ispitivanja je definisan standardom ASTM D 3039-76 [12]. U toku postupka ispitivanja kontinualno su registrovane deformacije u uzdužnom pravcu, ϵ_1 . Uvedeno opterećenje je registrovano pomoću merne ćelije kapaciteta 100 kN. Jedinično izduženje je mereno pomoću dvostrukog ekstenzomera HOTTINGER DD1. U pitanju su dva ekstenzomera paralelno vezana koja mere jedinično izduženje sa obe strane epruvete, a paralelna veza ekstenzomera omogućava usrednjavanje izmerenih vrednosti. Opseg merenja ovih ekstenzomera je $\pm 2,50$ mm; rade na principu mernih traka, a klase tačnosti su 0,05.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Zatezanjem u uzdužnom pravcu ispitivano je šest epruveta (3 uzorka čija je orijentacija vlakana $\pm 45^\circ$ i 3 uzorka čija je orijentacija vlakana $0/90^\circ$) radi dobijanja zatezne čvrstoće i modula elastičnosti u uzdužnom pravcu. Dimenzije poprečnog preseka, vrednosti zatezne čvrstoće i modula elastičnosti ispitivanih uzoraka su izračunate korišćenjem izraza (1), (2) i (3). Modul elastičnosti (E_{uzd}) je izračunavan iz jednačine (3) pri čemu se odnos $\Delta P/\Delta \epsilon_1$ određivan metodom linearne regresije iz pravolinijskog dela registrovanog dijagrama sila – izduženje.

$$A_0 = b \cdot d \quad (1)$$

$$R_{m,uzd} = \frac{P_{max}}{b \cdot d} \quad (2)$$

$$E_{uzd} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta P}{\Delta\varepsilon_1} \cdot \frac{1}{b \cdot d} \quad (3)$$

gde je:

$R_{m,uzd}$ - zatezna čvrstoća u uzdužnom pravcu, Mpa

P_{max} - maksimalna sila kidanja, N

A_0 - poprečni presek epruvete, mm²

b - širina epruvete, mm

d - debljina epruvete, mm

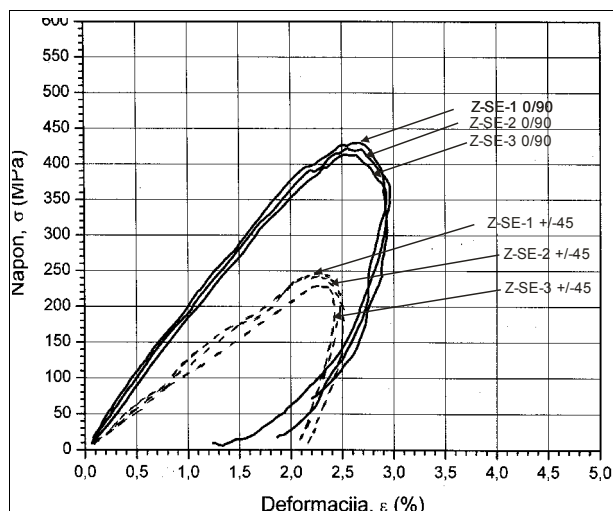
Može se konstatovati da je ispitivanje bilo uspešno, jer je kod svih ispitanih epruveta do loma dolazilo na sredini epruveta, u mernom delu.

Izračunate vrednosti zatezних čvrstoća u uzdužnom pravcu i odgovarajućih modula elastičnosti su prikazane u tabeli 6.

Radi bolje preglednosti i boljeg uvida u karaktere ponašanja ispitivanih uzoraka, na slici 3 je dat uporedni dijagram napon – deformacija ($\sigma - \varepsilon$) svih šest ispitivanih epruveta.

Tabela 6 - Rezultati ispitivanja uzoraka na zatezanje

Oznaka epruvete	Širina epruvete b (mm)	Debljina epruvete d (mm)	Poprečni presek epruvete A_0 (mm ²)	Maksimalna sila kidanja P_{max} (KN)	Zatezna čvrstoća $R_{m,uzd}$ (MPa)	Modul elastičnosti E_{uzd} (GPa)
Z-SE -1 0/90°	14,9	5,03	74,95	31,6	422	89,7
Z-SE -2 0/90°	15,1	4,95	74,75	32,1	429	90,1
Z-SE -3 0/90°	14,7	5,02	73,80	30,6	414	86,7
Z-SE -1 ±45°	15,16	5,40	81,86	20,23	247	43,85
Z-SE -2 ±45°	15,12	5,34	80,74	19,45	241	42,80
Z-SE -3 ±45°	15,07	5,18	78,06	18,41	236	38,7



Slika 3 - Uporedni izgled dijagrama napon – deformacija ($\sigma - \varepsilon$) za sve ispitane uzorke

Može se konstatovati relativna ujednačenost dobijenih vrednosti maksimalnih sila kidanja P_{max} kako uzoraka čija je orijentacija vlakana ±45° tako i uzoraka čija je orijentacija vlakana 0/90°. Možda je nešto manja vrednost za uzorke Z-SE -3 0/90° (30,6 KN) i Z-SE -3 ±45° (18,41 KN), ali je i to objašnjivo s obzirom na manju dimenziju poprečnog preseka ovih uzoraka. Ove epruvete su i ranije pukle. Takođe se iz tabele 6 može zapaziti da je vrednost maksimalnih sila kidanja P_{max} dosta niža za uzorke čija je orijentacija vlakana ±45° u odnosu na uzorke čija je orijentacija vlakana 0/90°.

Prikaz jednog prelomljenog uzorka (Z-SE-1 ±45°) dat je na slici 4.

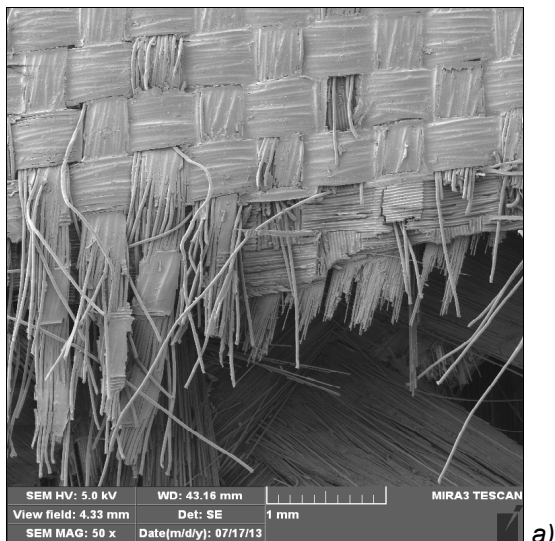


Slika 4 - Izgled prelomljenih uzoraka (Z-SE-1 ±45°)

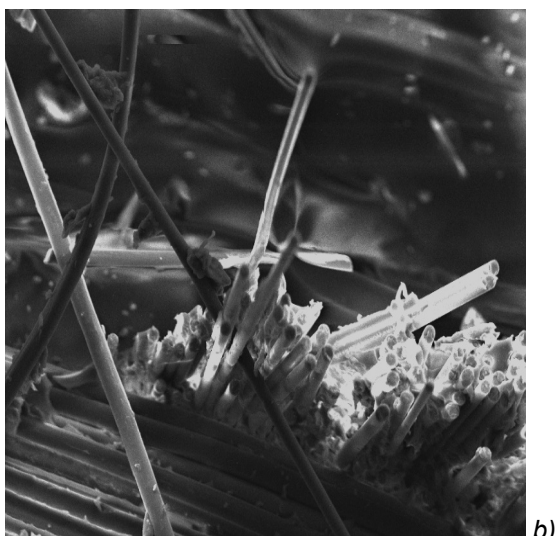
Na osnovu rezultata šest ispitanih uzoraka, izračunata je srednja vrednost zatezne čvrstoće za svaku od dve grupe uzoraka, kao i srednja vrednost modula elastičnosti. Srednja vrednost zatezne čvrstoće uzoraka orijentacije vlakana 0/90° iznosi 421,7 MPa, a uzoraka orijentacije vlakana ±45° 241,3 MPa, dok srednje vrednosti modula elastičnosti za uzorke orijentacije vlakana 0/90° odnosno ±45° iznose 88,8 i 41,8 GPa, respektivno. Primećuje se da su i srednje vrednosti zatezne čvrstoće i modula elastičnosti dosta niže za uzorke sa orijentacijom vlakana ±45° u odnosu na uzorke sa orijentacijom vlakana 0/90°. Može se konstatovati za ovakvu vrstu mehaničkog ispitivanja relativno malo odstupanje izmerenih, odnosno izračunatih vrednosti i za zateznu čvrstoću i modul elastičnosti od srednjih vrednosti za svaku od obe grupe ispitanih uzoraka.

Odstupanje pojedinačnih vrednosti kod modula elastičnosti od srednje vrednosti, objašnjava se činjenicom da je bilo relativno teže precizno odrediti modul elastičnosti zbog nestabilnog linearnog dela na dijagramu i već relativno malog početnog zakrivljenja krive napon – deformacija ($\sigma - \varepsilon$). Što se tiče zatezne čvrstoće, poznato je da se zbog isprepletanosti vlakana i različite raspodele napona duž ose vlakana, sva vlakna ne opterećuju isto.

Rezultat toga je i različito vremensko pucanje vlakana, tj. neka vlakna pucaju pri manjim a neka pri većim opterećenjima. Vlakna koja ranije pucaju prouzrokuju poremećaj u zoni loma, tj. javljaju se lokalni smičući naponi uz pokidano vlakno, što se ne može na svakom uzorku podudariti, pa iz tog razloga dolazi i do različitih maksimalnih sila opterećenja pri lomu, (slika 5).



a)

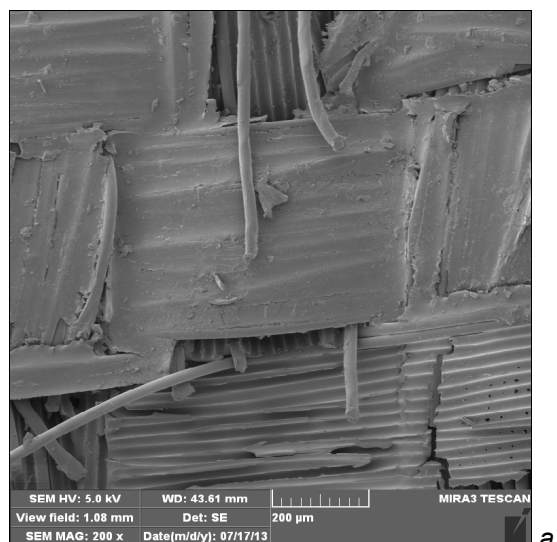


b)

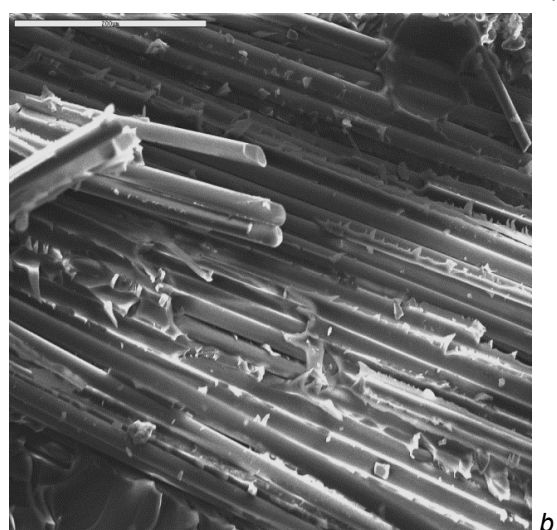
Slika 5 - Različito vremensko pucanje vlakana prikazano na SEM-u: a) orijentacija vlakana 0/90°, b) orijentacija vlakana ±45°)

Vlakna koja ranije pucaju prouzrokuju poremećaj u zoni loma, tj. javljaju se lokalni smičući naponi uz pokidano vlakno, što se ne može na svakom uzorku 100%-no podudariti, pa iz tog razloga dolazi i do različitih maksimalnih sila opterećenja pri lomu. Zato dolazi do manjeg rasipanja rezultata zatezne čvrstoće, a još više modula elastičnosti dobijenih sa ispitivanja. Smicanje se ogleda u tome da je prilikom rasta opterećenja dolazilo do "klizanja" celih slojeva vlakna po debljini uzorka što

je dovelo do poremećaja naponskih stanja i deformacija u slojevima izazvanih smicanjem. Vlakna su na početku neoštećena, ali se mikroprslina koje su već postojale u matrici progresivno povećavaju čineći makroprslina u njima. Time se matrica oštećuje i praktično vlakna kroz te makroprslina "klize" po debljini između slojeva. Vlakna su i dalje neoštećena, ali su znatno promenila svoja prvobitno namotana mesta u slojevima čime su po debljini ostajale znatne šupljine. Na taj način su u tim zonama preostali snopovi vlakana bili u situaciji da podnose dodatno opterećenje što je u krajnjoj liniji rezultovalo dodatnim odvajanjem vlakana iz matrice, nastajanjem novih prslina i prvim lomovima vlakana. Primer nastalog smicanja celih slojeva je prikazan na slici 6. Očigledno je da je od celog sloja ostalo samo par vlakana, dok su ostala usled opterećenja skliznula niz susjedni sloj. Na taj način je sloj koji je ostao dodatno opterećen.



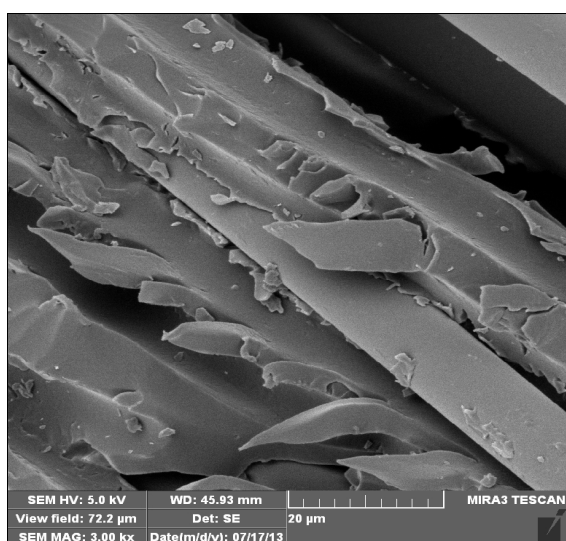
a)



b)

Slika 6 - Smicanje celih slojeva vlakana: a) orijentacija vlakana 0/90°, b) orijentacija vlakana ±45°)

O značajnom učešću smicajnih komponenti napona ukazuju i dobijene zavisnosti napon-deformacija ($\sigma - \epsilon$), koja nije linearna za razliku od većine kompozita (slika 3). Nelinearnost je nastajala na približno 30÷35% od vrednosti maksimalnih napona. Povećanjem napona dolazilo je do pucanja veze vlakno-matrica i prslina nastala lomom vlakana je rasla duž susjednih vlakana i izazivala makroprslinu, slika 7. Rezultat toga je pucanje vlakana i lokalno raslojavanje ali je kompozit i dalje nosio spoljašnje opterećenje. Sa daljim porastom napona lokalna oštećenja su se širila, dolazilo je do pucanja celih grupa vlakana, progresivnog raslojavanja i konačnog loma. Lom je bio praćen jakim akustičnim efektom koji je bio posledica istovremenog pucanja velikog broja vlakana.



a)

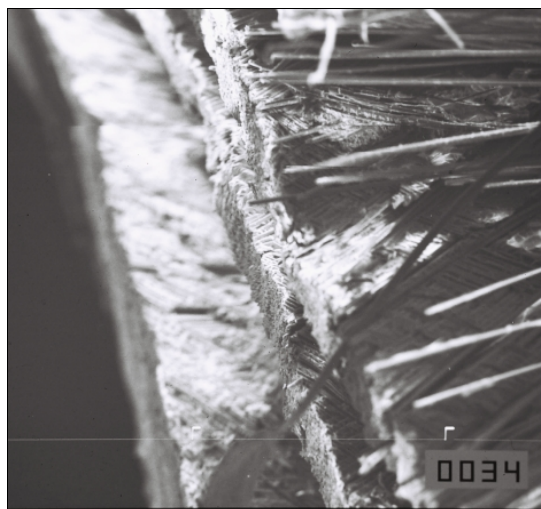


b)

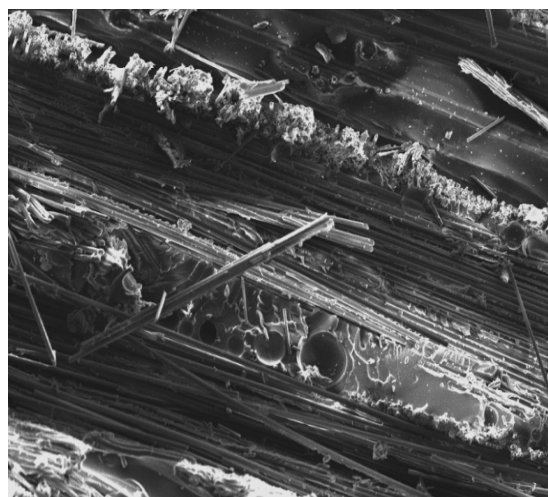
Slika 7 - Makroprslina nastale razdvajanjem veze vlakno-matrica: a) orijentacija vlakana 0/90°, b) orijentacija vlakana ±45°)

Raslojavanje slojeva je sigurno prateći fenomen razaranja ovih epruveta. Površina raslojavanja

ima izgled koji odgovara površinama interlaminarnog smicanja, što je prikazano na slici 8.



a)



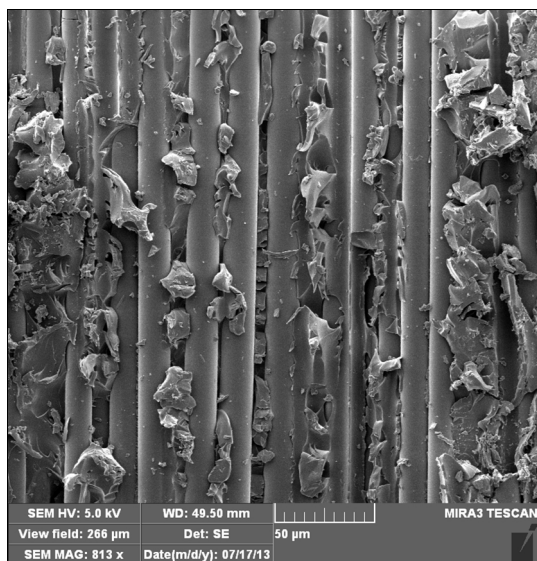
b)

Slika 8 - Raslojavanje epruvete tokom zatezanja: a) orijentacija vlakana 0/90°, b) orijentacija vlakana ±45°)

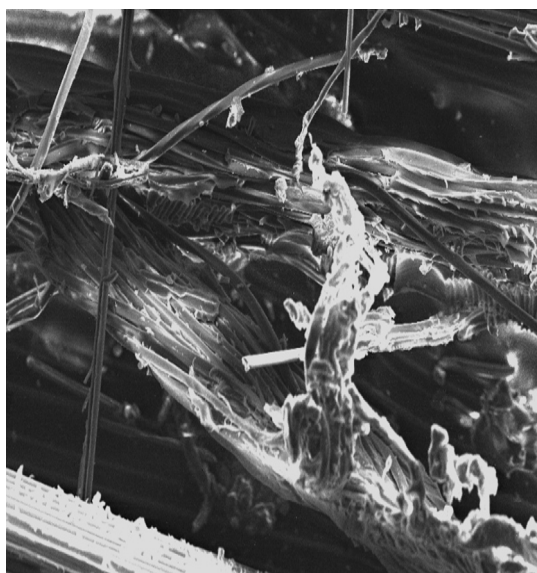
Takođe je karakteristično nastajanje početnih prslina usled nedostatka matrice (slika 9). Posledica toga je da vlakna nisu pucala sva istovremeno. Prvo su pucala vlakna koja nisu bila obložena matricom, a na kon toga i druga koja su tada bila preopterećena silom zatezanja.

5. ZAKLJUČAK

Velika primena kompozitnih materijala je u znatnoj meri zasnovana na dobrom ponašanju u otežanim radnim uslovima, visokom pritisku, brzini, udarima, vibracijama, a sve zahvaljujući svojoj strukturi i specifičnim mehanizmima pri različitim opterećenjima. To posebno favorizuje njihovu primenu na izgradnji mašinskih konstrukcija većih odgovornosti. Samim tim i razvoj i istraživanje novih i još odgovornijih materijala predstavlja jedan od najznačajnijih zadataka za istraživanje.



a)



b)

Slika 9 - Nedostatak matrice: a) orijentacija vlakana $0/90^\circ$, b) orijentacija vlakana $\pm 45^\circ$

U ovom radu su izračunate su vrednosti zatezanih čvrstoća i određeni moduli elastičnosti za dve grupe uzoraka, structure vlakana $0/90^\circ$ i $\pm 45^\circ$. Srednja vrednost zatezne čvrstoće iznosi uzoraka orijentacije vlakana $0/90^\circ$ iznosi 421,7 MPa, a srednja vrednost modula elastičnosti 88,8 GPa, dok za uzorke orijentacije $\pm 45^\circ$ srednja vrednost zatezne čvrstoće iznosi 241,3 MPa, a srednja vrednost modula elastičnosti 41,8 GPa. Iz navedenog se može zapaziti da su prethodno navedene vrednosti dosta niže za uzorke sa orijentacijom vlakana $\pm 45^\circ$, a iz čega proizilazi da uzorci iz ove grupe oštećuju se i pucaju pri manjim opterećenjima u odnosu na uzorke sa orijentacijom vlakana $0/90^\circ$.

Da bi se dobila prava slika o ispitivanom kompozitnom materijalu izvedena je i mikromehanička

analiza, pri čemu je na prelomnim površinama epruveta, čak i golim okom uočeno raslojavanje i izvlačenje vlakana iz materijala, a pod uvećanjem i pucanje vlakana koje je kulminiralo konačnim lomom kompozitnog materijala, što je bilo praćeno jakim akustičnim efektom. Mikromehanička analiza je ukazala na sve poznate mehanizme koji se javljaju pri ovakvim ispitivanjima.

Na kraju se može zaključiti da se dobijeni rezultati kreću u granicama literaturno poznatih podataka za ovu vrstu ispitivanja i slične strukture materijala i da se izvedenim eksperimentalnim ispitivanjima i mikrostrukturnom analizom došlo do dragocenih podataka koji predstavljaju jedan od elemenata za potpunu karakterizaciju ispitivanog materijala sa dve različite strukture vlakana.

6. LITERATURA

- [1] B.D.Agarwal, L.J.Broutman (1990) Analysis and performance of fiber composites, John Wiley & Sons, Inc, USA.
- [2] S.Putić (2006) Mehanička svojstva polimernih kompozitnih materijala, knjiga, Tehnološko-Metalurški fakultet, Beograd.
- [3] R.Aleksić, V.Radojević, R.Jančić (2007) Funkcionalni kompozitni materijali, beleške sa predavanja, skripta, Tehnološko-Metalurški fakultet, Beograd.
- [4] V.Vasiliev, E.Morozov (2001) Mechanics and Analysis of Composite materials, book, Elsevier Science Ltd.
- [5] Z.Gurdal, R.Haftka, P.Hajela (1999) Design and Optimization of Laminated Composite Materials, John Wiley&Sons, INC.
- [6] M.M.Schwartz (1984) Composite Materials Handbook, McGraw-Hill, Inc, USA.
- [7] S.Putić (2005) Zatezna svojstva polimernog kompozitnog materijala poliaramidna vlakna (KEVLAR 129) -POLI(VINILBUTIRAL) (PVB), MJOM, 45-52.
- [8] K.Kaw (2006) Mechanics of Composite Materials, second edition, Taylor&Francis CRC PRESS.
- [9] J.N.Reddy (2003) Mechanics of Composite Materials and Shells-Theory and Analysis, second edition, Taylor&Francis CRC PRESS.
- [10] J.Petrović, D.Bekrić, I.Vujičić, I.Dimić, S.Putić (2013) Microstructural characterization of glass-epoxy composites subjected to tensile testing, Acta Periodica Technologica, APTEFF, 44, 151-162.
- [11] S.Putić (2008) Mechanics of Composite Materials, book, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade.
- [12] Annual book of ASTM Standards (1999) Vol.15.03, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

ABSTRACT**MICROMECHANICAL CRACK ANALYSIS OF GLASS-EPOXY LAMINATED COMPOSITES SUBJECTED TO TENSION LOAD**

The main objective of this study is to determine tensile properties of the glass-epoxy polymer composite material. The material is glass fiber 280 g/m², "twill woven" with 100 cm width, type - Interglas 92125, and epoxy resin type MGS L-135, where samples are molded using hand manual method with 35% fiber weight per volume. Orientations were 0/90° i ±45°. In accordance with appropriate standards, tensile strength and modulus of elasticity were determined. Beside the analysis of the results obtained during the experiment, micro-mechanical analysis of the tensile failure appearance and development was conducted based on the observed cracked surface, which led to a confirmation of all characteristic mechanisms and cracks expected for this type of material and study. Micromechanical analysis performed on the cracked surfaces of the investigated samples, has led to a definition of a structure which is more suitable for exploitation of this material in a presence of this type of external load.

Keywords: *micromechanical analysis, glass-epoxy composite materials, tensile properties of glass-epoxy composite materials, tensile test of glass-epoxy composite materials.*

Scientific paper

Paper received: 17. 06. 2015.

Paper accepted: 19. 08. 2015.

Paper is available on the website: www.idk.org.rs/casopis