

MILJANA KRSTI ¹, DRAGOLJUB ILI ²,
 DRAGOLJUB BEKRI ³, JELENA PETROVI ¹,
 IVICA VUJI I ¹, SLAVIŠA PUTI ¹

Originalni nau ni rad
 UDC:620.173/174

Mikromehanička analiza loma laminatnog staklo-epoksi kompozitnog materijala ispitivanog savijanjem

Predmet i cilj ovog rada predstavlja mikromehani ka analiza lomova nastalih mehani kim ispitivanjima laminatnog staklo-epoksi kompozitnog materijala na savijanje. Struktura staklo-epoksi kompozitnog materijala je stakleno platno 280 g/m², "twill tkanje", širine 100 cm, tip - Interglas 92125 i epoksi smola tip MGS L-135. Uzorci su oblikovani ru nom metodom sa 35% zapreminskog udela vlakana. Prethodnim mehani kim ispitivanjima su dobijeni relevantni podaci o zateznim i savojnim mehani kim svojstvima. Analizom sa fotografija na prelomnim površinama ve ih uve anja i sa skening elektronskog mikroskopa (SEM) bi e izvedena mikromehani ka analiza kojom e se do i do saznanja o mehanizmima ošte enja i razvoju prsline do kona nog loma pri delovanju savojnog optere enja.

Ključne reči: mikromehani ka analiza, staklo-epoksi kompozitni materijali, mehanika ošte enja kompozita, ispitivanje na savijanje staklo-epoksi kompozitnog materijala

UVOD

Razumevanje mikromehanizama ošte enja u kompozitnim materijalima pri razli itim uslovima promenljivog optere enja u toku eksploatacije je od velikog zna aja pri projektovanju, jer se za svaku posebnu primenu odre uje žilavost kompozita, otpornost na promenljivo i udarno optere enje, brzina akumulacije ošte enja, preostala vrsto a, krutost i vek strukturnih komponenata [1]. Ošte enja se sastoje od razli itih kombinacija nastajanja prsline u matrici, raskidanja veza izme u vlakana i matrice, raslojavanja i lokalnog prekida vlakana, a zavise od strukture materijala, broja slojeva i orijentacije vlakana u njima, procesa oblikovanja, stanja napona i uvedenog optere enja [2,3]. Alternativni pristup u razumevanju ovih pojava je preko unapred utvr enih mikromehani kih modela mehanizama ošte enja. Me utim, obzirom na veliki broj istovremeno deluju ih parametara u svakoj realnoj konstrukciji, modeli kao što su lom vlakana i matrice, delaminacija i odvajanje vlakana od matrice retko mogu da budu dovoljno precizni da bi bili od koristi projektantu [4]. Oni predstavljaju samo iskustvene modele koji vode ka razvoju nove grane mehanike koja se naziva mehanika ošte enja [5,6]

Ošte enje u kompozitnim materijalima bilo je i ostaje predmet brojnih ispitivanja. Do danas je razvijen i primenjen veliki broj metoda sa ili bez razaranja za utvr ivanje nastanka i razvoja ošte enja u njima [7]. Ošte enja su veoma esto složena,

tako da je odre ivanje njihovog modela sa aspekta mehanike loma teško i ponekad nerealno. Zbog složenosti, ovom temom su se bavili mnogobrojni istraživa i. Rezultati dobijeni ispitivanjem uzoraka na savijanje staklo-epoksi kompozitnih materijala predstavljeni su u radovima [8]. Isto tako, zna ajni su rezultati ispitivanja ugljeni na vlakna-epoksi smola kompozitnih materijala koji su dati u [9] zbog pore enje osobina sa staklo-epoksi kompozitnim materijalima. Promena elast nosti koja nastaje kao posledica promena na mikro nivou u kompozitnom materijalu objašnjena je u radovima [10,11]. Ispitivanje mehani kih osobina i mehanizama nastajanja mikroprrsline u teksitnim kompozitnim materijalima je veoma zna ajno i može biti jako korisno [12]. Pojava i rast prsline sami po sebi ne uzrokuju kriti ne uslove, ali ukupan efekat dovodi do smanjenja utvr enih mehani kih karakteristika, što može da rezultira i lomom kompozita [13,14].

Predmet i cilj ovog rada predstavlja mikromehani ka analiza lomova nastalih mehani kim ispitivanjima laminatnog staklo-epoksi kompozitnog materijala na savijanje. Prethodnim mehani kim ispitivanjima su dobijeni relevantni podaci o zateznim i savojnim mehani kim svojstvima. Analizom sa fotografija na prelomnim površinama ve ih uve anja i sa skening elektronskog mikroskopa bi e izvedena mikromehani ka analiza kojom e se do i do saznanja o mehanizmima ošte enja i razvoju prsline do kona nog loma pri delovanju savojnog optere enja.

MATERIJALI I METODE

Struktura ispitivanog materijala je stakleno platno 280 g/m², "twill tkanje", širine 100 cm, tip - Interglas 92125 i epoksi smola tip MGS L-135.

Adrese autora: ¹Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Karnegijeva 4
²Vazduhoplovna akademija, Beograd, ³Univezitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

Primljeno za publikovanje: 10. 03. 2014.

Prihvajeno za publikovanje: 28. 05. 2014.

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

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 ± 5%
Zatezna vrsto a, 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 epoksi smole su prikazana u tabelama 3 i 4.

Tabela 3. Fizička svojstva umešane smole

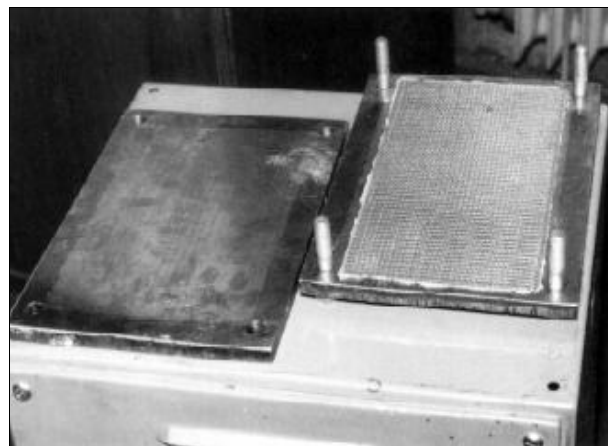
Test	Jedinice	Vrednosti
Gustina na 25°C	g/cm ³	1,14-1,18
Viskoznost na 25°C	mPa s	2300-2900
Epoksi ekvivalent	-	170-189
Epoksi vrednost	-	0,53-0,59

Tabela.4 - Mehanička svojstva umešane smole

Svojstva	Jedinice	Vrednosti
Zatezna vrsto a, R _m	MPa	68-80
Deformacija, ε	%	5-7
Savojna vrsto a, R _f	MPa	110-130
Modul elastičnosti, E	MPa	2,9-3,2
Pritisna vrsto a	MPa	110-130
Udarna žilavost /Charpy/, a _n	KJ/m ²	30-50

Tehnološki postupak proizvodnje staklo-epoksi kompozitnih ploča.

Staklo-epoksi kompozitne ploče su oblikovane ručno metodom oblikovanja u kalupu. Izgled korišćenog kalupa je prikazan na slici 1. Kalup se sastoji od dve metalne ploče (gornje i donje), koje se nakon postavljanja materijala pritežu uz pomoć četiri vijka. Ime se ostvaruje neophodna sila pritiska.



Slika 1 - Izgled kalupa

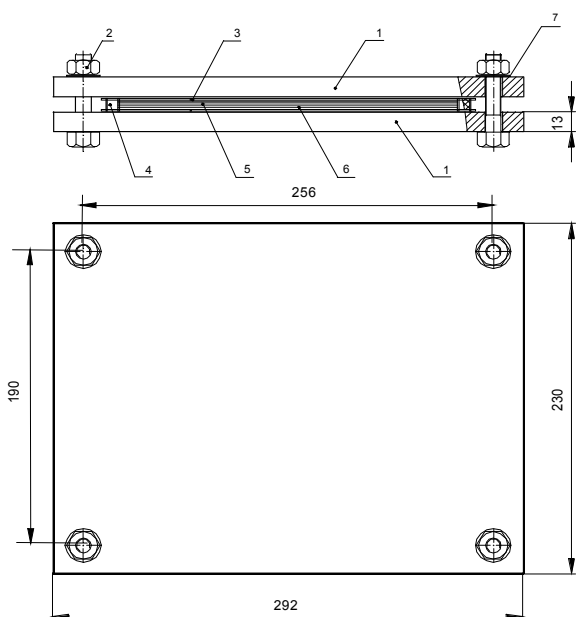
Ceo tok izvedenog procesa oblikovanja materijala se može prikazati kroz sledeće faze rada:

1) *Priprema kalupa*: Sa površina metalnih ploča kalupa su prvo uklonjene mehaničke nečistoće, a zatim je dodatno očišćena površina ostvareno odgovarajućim organskim rastvaračem (metil-etil ketonom). Na taj način je dobijen finalni proizvod zadovoljavajućeg izgleda, koji se lako odvajao od kalupa.

2) *Priprema osnovnog i pomoćnog materijala*: U ovoj fazi rada je izvršena priprema strukturnih komponenata. Staklena tkanja različitih gustina i orijentacija su isecana prema odgovarajućim dimenzijama kalupa. Neposredno pre samog procesa oblikovanja izmešana je smola i otvarač. Takođe, radi zaštite kalupa ali i dodatnog olakšavanja odvajanja finalnog proizvoda od kalupa, preko metalnih ploča je postavljena folija od celofana. Kao pomoćni materijal su korišćene i sunđeraste trake dužina jednakih dimenzijama metalnih ploča i širine 1 cm. Ista je uloga objašnjena u opisu samog postupka izrade.

3) *Opis postupka izrade*: Preko prethodno postavljene folije od celofana na donju metalnu ploču kalupa postavljao se određeni broj slojeva staklenog tkanja, odgovarajuće gustine i strukture. Neposredno uz njihovu ivicu su lepljene sunđeraste trake kojima se kasnije upijao višak smole. Na ovako pripremljenu podlogu se u određenom odnosu ravnomerno dodavala smeša epoksidne smole i otvarača, a zatim se ovako formirani materijal sa gornje strane zatvorio slojem još jedne folije od celofana. Sve vreme se vodilo računa da ne dođe do nastajanja mehura i vazduha tako što se

zaostali vazduh istiskivao pomoću u pritisnog valjka. Na taj način se ujedno ostvarilo i bolje kvašenje staklenih vlakana smolom, pa je formirani finalni materijal i kompaktniji. Postavljanjem gornje ploče i kalupa preko materijala i pritezanjem vijaka (ime se uz težinu kalupa obezbedila neophodna sila pritiska unutar kalupa), završena je ova faza. Nakon toga je materijal ostavljen na sobnoj temperaturi (20°C) do potpunog ovršavanja koje se završilo nakon 24 sata. Na slici 2 je data skica zatvorenog kalupa sa odgovarajućim dimenzijama i pozicijama.



Slika 2 - Skica korišćenog kalupa za oblikovanje:
Pozicije: 1 - Metalne ploče, 2 - Vijak i navrtka (M12),
3 - Zaštitni sloj celofana, 4 - Sunđer, 5 - Sloj epoksidne smole, 6 - Sloj staklenog tkanja, 7 - Podložna pločica

Nakon završenog ovršavanja materijala i otvaranja kalupa, sa dobijenih laminata su lako uklanjane folije od celofana, a površine su bile zadovoljavajućih kvaliteta i izgleda tako da nisu zahtevale dodatnu obradu. Pošto je za odvijanje procesa polimerizacije, tj. umrežavanja, potrebno 7 dana, finalni proizvod se za to vreme uvao na sobnoj temperaturi, a nakon toga su iz laminata isecane epruvete standardnih dimenzija potrebne za odgovarajuća mehanička ispitivanja.

OZNAKE ISEČENIH UZORAKA I TOK ISPITIVANJA

Ispitivani su se uzorci (MA-SE) sećeni iz oblikovanih ploča. Oznake uzoraka su MA-SE-1, MA-SE-2 i MA-SE-3, MA-SE-4, MA-SE-5. Odrzene su odgovarajuće zatezne vrstove i moduli elastičnosti. Postupak ispitivanja, oblik i dimenzije epruveta

su definisani standardom ASTM D 790 [15]. Ispitivanje je izvedeno na elektro-mehaničkoj kraljici INSTRON 1332 (slika 3).



Slika 3 - Odvijanje eksperimenta na elektro-mehaničkoj kraljici INSTRON 1332

Tipičan izgled prelomljenih epruveta ispitivanih na savijanje prikazan je na slici 4.



Slika 4 - Izgled prelomljenih uzoraka MA-SE-1 i MA-SE-2

Eksperiment određivanja savojnih svojstava kao što su vrstova na savijanje i ugib je izveden za staklo-epoksi kompozitni materijal radi dobijanja njegovih relevantnih mehaničkih svojstava.

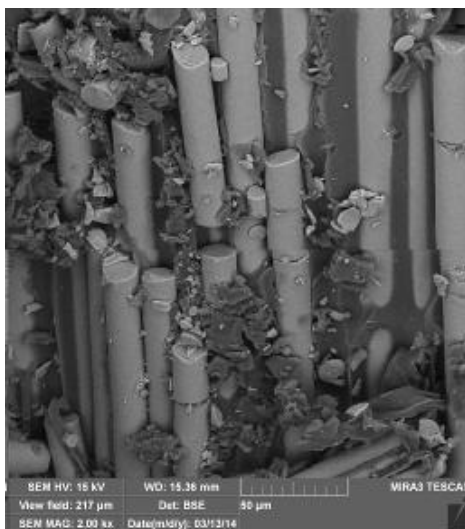
Mikromehanička analiza je izvedena na skenirajućem elektronskom mikroskopu (SEM) na Tehnološko-metalurškome fakultetu u Beogradu. Korišćen je SEM TESCAN Mira3 XMU na 5 kV. Prethodno su uzorci prevućeni slojem legure Au-Pd.

REZULTATI I DISKUSIJA

Na osnovu prethodnih ispitivanja na savijanje kompozitnog materijala staklo-epoksi, na osnovu pet ispitanih uzoraka, dobijena je srednja vrednost savojne vrstove 306,58 MPa kao i srednja vrednost modula elastičnosti 4,96 mm i na kraju srednja vrednost ugiba, koja iznosi 12,72 mm. Može se konstatovati za ovakvu vrstu mehaničkog ispitivanja relativno malo odstupanje izmerenih, odnosno

izra unatih vrednosti i za savojnu vrstu u i modul elastičnosti od srednjih vrednosti.

Nešto veće odstupanje vrednosti je kod modula elastičnosti, ali kao objašnjenje može poslužiti činjenica da je bilo relativno teže precizno odrediti modul elastičnosti zbog nestabilnog linearnog dela na dijagramu i veće relativno malog po etnog zakrivljenja krive napon – deformacija ($\sigma - \epsilon$). Što se tiče savojne vrste, 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.

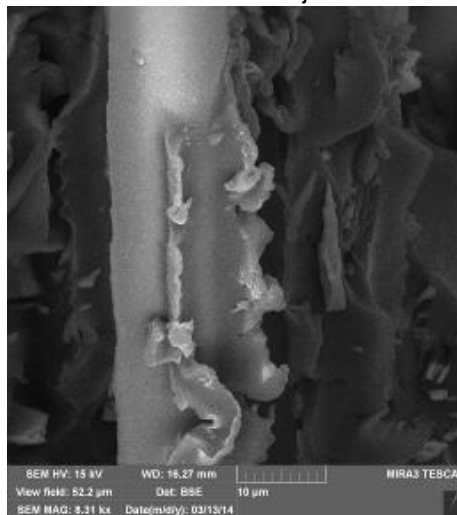


Slika 5 - Nedostatak matrice prikazan na SEM-u

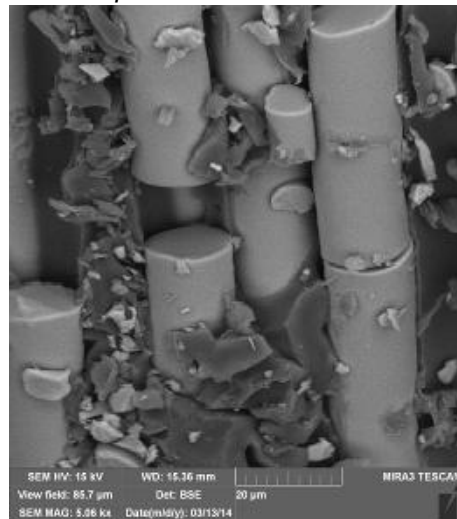
Kod ispitivanog kompozitnog materijala sa ojačanjem u vidu tkanja, zbog isprepletanosti vlakana u tkaninama i različitih raspodela napona duž njihovih osa, sva vlakna ne bivaju opterećena podjednako. Kao posledica neravnomerne raspodele javlja se različito vremensko pucanje vlakana, što dovodi do pojave lokalnih smičajnih napona uz pokidano vlakno u zoni loma. Povećanjem ovih napona dolazi do delaminacije, tj. kidanja veza vlakno-matrica, i prslina nastala lomom vlakana raste duž susednih vlakana, izazivaju i makroprslinu. Rezultat toga je i lokalno raslojavanje i pucanje vlakana, ali kompozitni materijal i dalje nosi spoljašnje opterećenje. Sa porastom napona lokalna oštećenja se šire, do konačnog loma je u svim slučajevima dolazilo uz akustični efekat, kao posledica pucanja velikog broja vlakana. Najveći u savojnu vrstu u i modul elastičnosti posedovao je uzorak sa najmanjim masenim udelom ojačanja. Takođe je karakteristično nastajanje po etnih prslina usled nedostatka matrice (slike 5 i 6). Posledica toga je

da vlakna nisu pucala sva istovremeno. Prvo su pucala vlakna koja nisu bila obložena matricom, a nakon toga i druga koja su tada bila preopterećena silom zatezanja.

Karakteristični su krivi lomovi vlakana usled nedostatka matrice što se može videti na slici 7 (vidi se ogoljeno vlakno-nema matrice). Prelom je kriv. Ravan prelom vlakana ukazuje na to da nije imalo šta da opterećuje vlakno i da se ono nije istezalo nego je odmah pucalo (bez potpore). Kod krivih vlakana do loma dolazi trenutno, bez ikakvih prethodnih elastičnih deformacija.



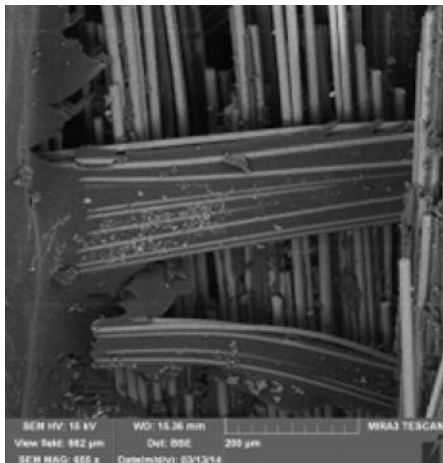
Slika 6 - Nedostatak matrice pri većem opterećenju prikazana na SEM-u



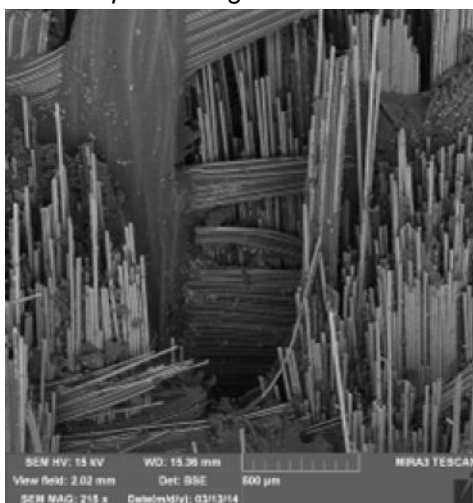
Slika 7 - Krivi lom vlakana usled nedostatka matrice prikazan na SEM-u

Ovaj model oštećenja nastaje usled postojanja mikrooštećenja u vlaknima. Kada nastane prekid vlakna, susedna vlakna nose veću opterećenja, što povećava mogućnost pojave novih prekida na susednim vlaknima. Lokalni prekid vlakana može se desiti prilikom dejstva pritisnog opterećenja. U tom slučaju, zbog nedostatka bočnog oslonca matrice (popuštanja veze vlakno-matrica), vlakno se izvija pri vrlo malom opterećenju i lako se lomi.

Na osnovu slike 8 može se zaključiti da je nastanak kritičnog naponskog stanja, a samim tim i prsline, vezan za razdvajanje veze vlakno-matrica, nakon čega dolazi do pucanja vlakna. Lom je kod svih ispitivanih uzoraka bio iniciran sa strane spoljašnjeg sloja vlakana, koja se više deformišu u odnosu na središnje i dovode do raslojavanja, čime ubrzavaju konačni lom uzoraka.



Slika 8 - Razdvajanje veze vlakno matrica prikazanog na SEM-u

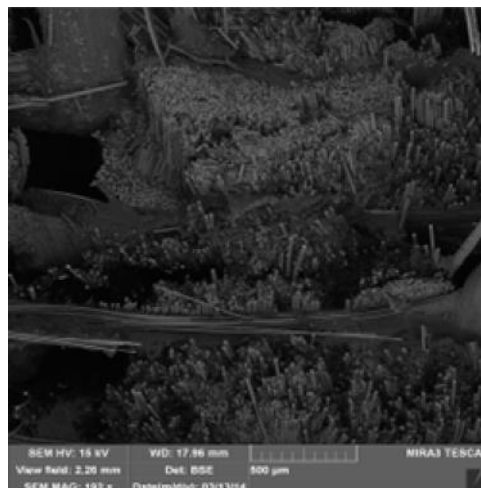


Slika 9 - Izvlačenje vlakana iz pletenica tkanja prikazanog na SEM-u

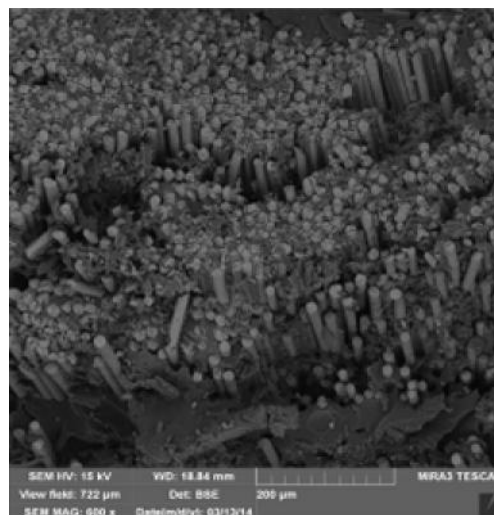
Raslojavanje je uoči i golim okom. Osim ovog mehanizma karakteristična je i pojava izvlačenja vlakana iz pletenica tkanja pri dejstvu opterećenja, što je prikazano na slici 9.

Na slikama 8 i 9 se direktno se vidi struktura tj. da je u pitanju je tkanje.

Raskidanje veza između vlakana i matrice predstavlja veoma čestu pojavu koja je karakteristična za loše impregnirana vlakna. Da bi se ova pojava u što većoj mjeri eliminisala, potrebno je uspostavljanje dobre adhezivne veze na međupovršini vlakna i matrice. Vrsta tog vezivanja mnogo utiče na čvrstoću kompozitnog materijala, jer je za raskidanje jakih veza potrebna velika količina energije.



Slika 10 - Prsline nastale usled gubitka matrice, prikazane na SEM-u



Slika 11 - Prsline nastale usled nedostatka matrice prikazane na SEM-u

Prsline u matrici paralelne sa vlaknima mogu da nastanu i rastu u svakom od slojeva, obzirom na pravac dejstva opterećenja. Pojava prsline unutar sloja izaziva povećanje koncentracije napona u tom sloju, a nastala prsline se dejstvom smicajnih napona prenosi kroz matricu na susedne slojeve. Prsline se zaustavlja na određenoj udaljenosti, a tada se naponi u sloju sa početnom prsline ponovo povećavaju i mogu da izazovu još jednu prsline ili rast postojećih prsline. Ovaj mehanizam se ponavlja sve dok se ne dostigne zasićenje prsline. Pri zasićenju, razmak između prsline je manji od minimalnog razmaka koji je potreban za prenos dovoljno velikog napona koji može izazvati pojavu nove prsline. Ovaj minimalni razmak zavisi od svojstava sloja i od okolnih (susednih) slojeva, ali ne i od delujućeg opterećenja.

Na slikama 10 i 11 vide se prsline koje su nastale usled gubitka matrice usled savijanja. Na obe slike se lepo vide rasekline.

ZAKLJU AK

Mikromehani ka analiza staklo-epoksi kompozitnog materijala na savijanje je ukazala na sve poznate mehanizme koji se javljaju pri ovakvim ispitivanjima. Razli ito vremensko pucanje vlakana je posledica specifi nosti tkanja i isprepletanosti vlakana i razli ite raspodele napona duž ose vlakana. Vlakna koja ranije pucaju prouzrokuju poreme aj u zoni loma, javlja se smicanje a samim tim se javljaju lokalni smi u i naponi uz pokidano vlakno. Smicanje se ogleđa u tome da je prilikom rasta optere enja dolazilo do "klizanja" celih namotanih slojeva vlakna po debljini uzorka što je dovodilo do poreme aja naponskih stanja i deformacija u slojevima. Pove anjem napona dolazilo je do pucanja veze vlakno-matrica i prslina nastala lomom vlakana je rasla duž susednih vlakana i izazivala makroprslinu. Rezultat toga je pucanje vlakana i lokalno raslojavanje, ali je kompozit i dalje nosio spoljašnje optere enje. Sa daljim porastom napona lokalna ošte enja su se širila, dolazilo je do pucanja celih grupa vlakana, progresivnog raslojavanja i kona nog loma. Lom je bio pra en jakim akustičnim efektom koji je posledica istovremenog pucanja velikog broja vlakana.

Dakle, mikromehani kom analizom loma laminatnog staklo-epoksi kompozitnog materijala se došlo do dragocenih podataka o veku trajanja i mehanizmima nastanka loma ispitivanog materijala.

LITERATURA

- [1] Hergenrother, P. M., Johnston, N. J., (1988), *Polimer Mater. Sci. Eng. Proc.*, 59, 697.
- [2] Agarwal B. D., Broutman L.J., (1990), *Analysis and performance of fiber composites*, John Wiley & Sons, Inc, USA.
- [3] Eager, T.W., (1991), *Whither advanced materials*, Adv. Mater.Processes.
- [4] Uskokovi P., Aleksi R., (2005), Optička vlakna kao senzori za detekciju mehani kog ošte enja u kompozitnim materijalima, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd.
- [5] Puti S., (2006), *Mehani ka svojstva polimernih kompozitnih materijala*, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
- [6] Aleksi R., Radojevi V., Jan i R., (2007), *Funkcionalni kompozitni materijali, beleške sa predavanja, skripta*, Tehnološko-Metalurški fakultet, Beograd.
- [7] Schwartz M. M., (1984), *Compozite Materials Handbook*, McGraw-Hill, Inc, USA.
- [8] Catangiu A., Dumitrescu A.T., Ungureanu D., (2011), *Experimental Results For Bending Fatigue Behaviour Of Glass-Epoxy Composite Materials*, The Scientific Bulletin of Valahia University – Materials And Mechanics, Nr. 6 (9), 47-51.
- [9] Rathnakar G., Shivanan H. K., (2013), *Experimental Evaluation of Strength and Stiffness of Fibre Reinforced Composites under Flexural Loading*, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) 2(7), 219-222.
- [10] Dyer K.P., Isaac D.H., (1998), *Fatigue behaviour of continuous glass fibre reinforced composites*, Compos Part B (29B), 725–733.
- [11] Van Paepegem W., Degrieck J., (2001), Experimental setup for and numerical modeling of bending fatigue experiments on plain woven glass-epoxy composites, *Composites Structures*, 51(1), 1-8.
- [12] Yang B., Kozey V., Adanur S., Kumar S., (2000), Bending, compression, and shear behavior of woven glass fiber-epoxy, *Composites, Elsevier, Composites: Part B*, 31, 715-721.
- [13] Krivokuća M., Puti S., Uskokovi P., Aleksi R., (1999), Uticaj strukture na savojna svojstva laminarnog kompozitnog materijala, Zbornik izvoda, III Jugoslovenska Konferencija o Novim Materijalima YUCOMAT 99, Herceg-Novii, 228.
- [14] Puti S., Aleksi R., Burzi Z., Mom ilovi D., Uskokovi P., (1997), Influence of Processing on Static and Impact Bending Properties of Fiber Glass-Polyester Composites, Proceedings of 8th International Conference on "Mechanics and Tehnology of Composite Materials", Sofia, , 340-344.
- [15] Annual book of ASTM Standards (1999), Vol.15.03, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

ABSTRACT

MICROMECHANICAL FRACTURE ANALYSIS OF LAMINATED GLASS-EPOXY COMPOSITE MATERIAL TESTED BY BENDING

The object and purpose of this work is the micromechanical analysis of failures caused by mechanical tests of laminate glass-epoxy composite material in bending. The structure of glass-epoxy composite material is a glass fabric 280 g / m², "twill weave", width 100 cm, type - Interglas 92125 and epoxy resin type MGS L-135. Samples are shaped manual method with 35% volume fraction of fibers. Previous mechanical tests were obtained relevant data on tensile and flexural mechanical properties. By analyzing the images of fracture surfaces of larger magnification with a scanning electron microscope (SEM) will be performed micromechanical analysis that will lead to the knowledge of the mechanisms of damage and crack growth to final fracture in action bending loads.

Keywords: micromechanical analysis, glass-epoxy composite materials, damage mechanics of composites, testing for bending glass-epoxy composite material.

Scientific paper

Received for Publication: 10. 03. 2014.

Accepted for Publication: 28. 05. 2014.