

**ZATEZNA SVOJSTVA POLIMERNOG KOMPOZITNOG
MATERIJALA POLIARAMIDNA VLAKNA (KEVLAR 129) -
POLI(VINILBUTIRAL) (PVB)**

**TENSILE PROPERTIES OF FIBER-RESIN COMPOSITIES
THAT CONSIST OF POLYARMID FIBER (KEVLAR 129)
AND POLY(VINILBUTYRAL)**

S. PUTIĆ¹⁾, Z. BURZIĆ²⁾, MARINA STAMENOVIĆ³⁾, PREDRAG STAJČIĆ¹⁾

¹⁾Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu, ²⁾Vojno-tehnički institut
Vojske Jugoslavije, ³⁾Viša politehnička škola u Beogradu

Primljeno: 02. 12. 2005.

IZVOD

U radu su prikazana izvedena statička mehanička ispitivanja na zatezanje kompozitnog materijala sa ojačanjem od poliaramidnih vlakana (Kevlar 129) i matrice od poli(vinilbutirala) (PVB). Određeni su zatezna čvrstoća i modul elastičnosti prema odgovarajućim standardnim ispitivanjima. Pored izvedene analize dobijenih rezultata, a na osnovu izgleda prelomnih površina uzorka 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.

Ključne reči: kompozitni materijali, ispitivanje na zatezanje, mehanizam nastanka i razvoja oštećenja

ABSTRACT

Thanks to fact that composite material have usefully characteristic two or more materials, they are becoming more and more supstitute standard materials in every field of technique they start to. In this study static mechanical examinaton of tensile properties of fiber-resin composites that consist of polyaramid fiber (Kevlar 129) and poly(vinilbutyral) were performed. Beside analysis of experiment results, these studies consist micromechanical analysis of crack initiation and crack propagation during tension. The all failures and damage mechanisms under tension tests are proved and describe on crack surfaces of test specimens.

Key words: composite materials, tensile test, failure mechanism

UVOD

Razvoj savremenih materijala je u znatnoj meri zasnovan na kombinaciji korisnih svojstava različitih materijala koji se spajaju u kompozitni materijal. Kombinacijom velike čvrstoće i krutosti ojačavajućih vlakana sa plastičnošću matrice, omogućava se dobijanje materijala visokih tehničkih zahteva [1-3].

Ovakvi materijali se s pravom smatraju materijalima koji će predstavljati glavni pravac inovacije u bližoj i daljoj budućnosti. Vremenom je razvijen niz postupaka ispitivanja sa ciljem da se svojstva kompozitnih materijala što bolje upoznaju i na taj način što racionalnije iskoriste. Ispitivanja se ne izvode samo radi utvrđivanja svojstava nakon proizvodnje ili prijema, već vrlo često i radi raznih ekspertiza u svrhu utvrđivanja načina upotrebe i odgovornosti koja nastaje usled neelishodne upotrebe. U razvojnim centrima većih industrijskih preduzeća i naučno - istraživačkim institutima ispitivanja se vrše u cilju što potpunijeg upoznavanja i poboljšavanja svojstava novih materijala kako bi se dobili materijali za nove proizvode, odnosno nova područja primene.

Zatezna svojstva predstavljaju jednu od osnovnih i početnih oblasti ispitivanja kompozitnih materijala, pri čemu se utvrđuju modul elastičnosti, zatezna čvrstoća, deformacije i Poasonov koeficijent, koji predstavljaju pokazatelje ponašanja materijala pri zatezanju. Doprinos ovog rada predstavlja ispitivanje različitih struktura novog, laboratorijski oblikovanog kompozitnog materijala poliaramidna vlakna (Kevlar 129)-poli(vinilbutiral) (PVB). Određene su zatezne čvrstoće i modul elastičnosti prema odgovarajućim standardima. Pored izvedene analize dobijenih rezultata, a na osnovu izgleda prelomnih površina uzorka 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.

EKSPERIMENTALNI DEO

Svojstva materijala korišćenih u ispitivanju

Strukturne komponente kompozitnog materijala korišćenog u ispitivanju su [4]:

- poli(p-fenilentereftalatamid) (Kevlar 129) tkanje kao ojačanje; i
- poli(vinilbutiral)(PVB) kao matrica.

Materijal je oblikovan ručnom metodom u zatvorenom kalupu presovanjem na toplo.

Kao ojačanje je korišćeno p-aramidno vlakno Kevlar 129 u obliku tkanine, čija su svojstva prikazana u tabeli 1, dok su svojstva matrice prikazana u tabeli 2.

Oznake ispitivanih uzoraka i izvedena ispitivanja

U radu su izvršena statička mehanička ispitivanja na oblikovanim kompozitnim materijalima. Proces oblikovanja materijala izvršen je u zatvorenom kalupu u uređaju za toplo presovanje slojevitog kompozitnog materijala uz odgovarajući optimalni režim rada. Sve izrade su izvedene pri istom režimu, tako da su dobijeni uzorci približno istog procentualnog sadržaja ojačanja (tabela 3). Epruvete su isecane iz uzoraka prema standardnim dimenzijama iz tri ploče. Iz svake od ploča isečene su po tri epruvete pa se razlikuju tri ispitivane serije: Z-1, Z-2 i Z-3.

Tabela 1 - Svojstva aramidne tkanine

Table 1 – Aramidic texture properties

Širina, <i>cm</i>	160
Prepletaj	platno 1/1
Površinska masa, <i>g/m²</i>	280
Prekidna sila, <i>N/5cm</i>	
- osnova	182,4
- potka	252,6
Prekidno izduženje, %	
- osnova	9,0
- potka	7,5
Gustina žica, <i>br.žica/10cm</i>	
- osnova	120
- potka	130
Finoća prediva, <i>dtex</i>	
- osnova	1123 × 1
- potka	1111 × 1
Broj vlakana	1090

Tabela 2 - Svojstva termoplastične matrice

Table 2 - Thermoplastic matrix properties

Specifična težina,	1,058
Indeks refrakcije	1,48
Zatezna čvrstoća, <i>MPa</i>	23
Izduženje, %	210
Modul elastičnosti, <i>MPa</i>	5
Otpornost na cepanje, <i>MPa</i>	3
Poasonov odnos	0,5
Tvrdoća, Shore "A"	64
Specifična toplota, <i>J/kgK</i>	2100
Temperatura staklastog prelaza, <i>°C</i>	16
Toplotna provodljivost, <i>W/mK</i>	0,21
Dielektrična konstanta na 1kHz	4
Faktor disipacije na 1 kHz	1,8 10 ⁻⁴

Tabela 3 - Maseni udeo ojačanja u ispitivanim uzorcima

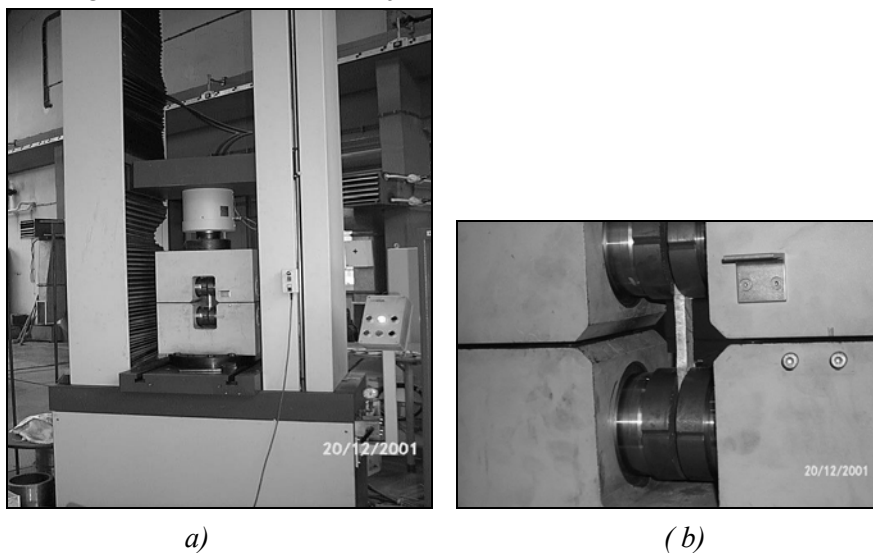
Table 3 – Mass part of reinforcement in test samples

Oznaka serije	Maseni udeo ojačanja, %
Z-1	65,4
Z-2	67,3
Z-3	66,8

U cilju utvrđivanja zatezne čvrstoće i modula elastičnosti kompozitnog materijala poli(p-feniltereftalamida)-poli(vinilbutirala) u radu su izvedena ispitivanja na zatezanje po standardnoj metodi ASTM D 3039 [5]. Pri datom ispitivanju su trebale da se koriste epruvete definisane navedenim standardom (250 x 25 x 2,5 mm), međutim usled specifičnosti materijala i usled ograničenja usled dimenzija napravljenih ploča iz kojih se isecaju, epruvete su modifikovane. Debljina epruvete je povećana na 8 do 9 mm, dužina cele epruvete smanjena je na 135 mm, a radni deo na 70 mm. Širina radnog dela epruvete je povećana za 5 mm, a širina osnove je ostala nepromenjena.

Uređaj za ispitivanje i postupak ispitivanja

Pre ispitivanja su izmerene širina i debljina epruveta sa tačnošću $\pm 1\%$. Ispitivanje je izvedeno na elektro-mehaničkoj kidalici SCHENCK TREBEL RM 200, slika 1 (a), uz korišćenje hidrauličkih čeljusti, slika 1 (b), u Vojno tehničkom institutu Vojske Jugoslavije u Beogradu. U toku ispitivanja kontinualno su registrovani sila F i izduženje Δl .



Slika 1. (a) Elektromehanička kidalica SCHENCK TREBEL RM 200; (b) Hidrauličke čeljusti elektronske kidalice SCHENCK TREBEL RM 200 sa postavljenom epruvetom

Figure 1. a) Test machine SCHENCK TREBEL RM 200;

b) Hydraulic jaws with test specimen

Zatezna čvrstoća je izračunavana prema jednačini (1):

$$R_{m1,z} = F_{max} / (b \cdot d) \quad (1)$$

gde je:

$R_{m1,z}$ - zatezna čvrstoća, MPa

F_{max} - maksimalna sila kidanja, N

b - širina epruvete, mm

d - debljina epruvete, mm

Modul elastičnosti je izračunat prema jednačini (2).

$$E_{1,z} = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon = \Delta F/(\Delta\varepsilon_{11} \cdot b \cdot d) \quad (2)$$

pri čemu se odnos $\Delta F/\Delta\varepsilon_{11}$ određivao metodom linearne regresije iz pravolinijskog dela registrovanog dijagrama sila-izduženje.

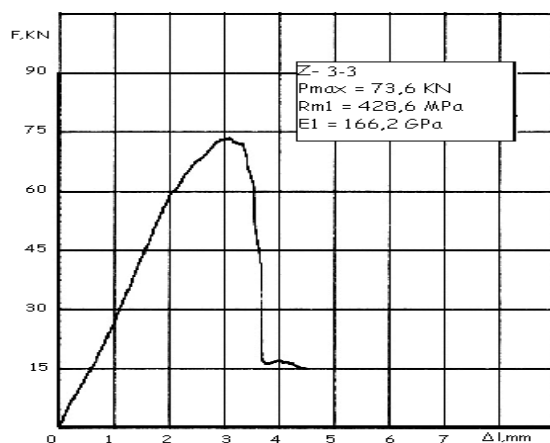
REZULTATI ISPITIVANJA

Na osnovu podataka dobijenih sa krivih sila-izduženje registrovanih na pisaču određene su vrednosti maksimalne sile kidanja, zatezne čvrstoće i modula elastičnosti (tabela 4). Karakterističan dijagram sila-izduženje dobijen za ispitivanu epruvetu Z-3-3, prikazan je na slici 2.

Tabela 4 - Rezultati ispitivanja epruveta

Table 4 – Sample test results

Oznaka epruvete	Širina epruvete b , mm	Debljina epruvete d , mm	Max. Sila kidanja P_{max} , kN	Zatezna čvrstoća R_{m1} , MPa	Modul elastičnosti E_1 , GPa
Z-1-1	21,2	8,5	90,8	503,9	129,2
Z-1-2	22,0	8,5	97,3	520,3	137,1
Z-1-3	20,5	8,5	85,4	490,1	126,7
Z-2-1	21,7	8,3	86,7	481,4	114,6
Z-2-2	22,1	8,3	95,4	520,0	120,4
Z-2-3	20,9	8,3	80,1	461,8	109,7
Z-3-1	22,0	9,0	90,2	455,6	151,5
Z-3-2	20,7	9,0	81,4	436,9	161,0
Z-3-3	19,1	9,0	73,6	428,6	166,2



Slika 2 - Dijagram sila-izduženje ($F-\Delta l$) ispitane kompozitne epruvete Z-3-3
Figure 2 – Force displacement ($F-\Delta l$) diagram for composite specimen Z-3-3

*Analiza rezultata i mikromehanička analiza loma uzoraka
ispitivanih na zatezanje*

Mehanička svojstva ispitivane serije epruveta Z-1 dobijenih zatezanjem pokazuju malo rasipanje rezultata oko srednjih vrednosti ($R_{m1sr}=504,8$ MPa, $E_{1sr}=131,0$ GPa). Kod zatezne čvrstoće ono se kreće u granicama od 0,1% (epruveta Z-1-1) do 3,1% (epruveta Z-2-2), dok je kod vrednosti modula elastičnosti uočeno rasipanje rezultata koje se kreće u granicama od 0,8% (epruveta Z-1-1) do 4,8% (epruveta Z-1-2).

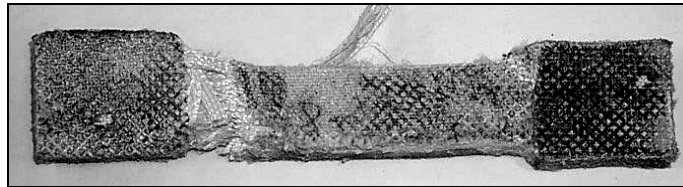
Što se tiče mehaničkih svojstava ispitivane serije epruveta Z-2 dobijenih zatezanjem uočava se malo rasipanje rezultata oko odgovarajućih srednjih vrednosti ($R_{m2sr}=487,7$ MPa, $E_{2sr}=114,9$ GPa). Kod zatezne čvrstoće ono se kreće u granicama od 1,3% (epruveta Z-2-1) do 6,6% (epruveta Z-2-2), dok je kod vrednosti modula elastičnosti uočeno rasipanje rezultata koje se kreće u granicama od 0,8% (epruveta Z-2-1) do 4,8% (epruveta Z-2-2).

Mehanička svojstva ispitivane serije epruveta Z-3 dobijenih zatezanjem pokazuju malo rasipanje rezultata oko srednjih vrednosti ($R_{m3sr}=440,4$ MPa, $E_{3sr}=159,5$ GPa). Kod zatezne čvrstoće ono se kreće u granicama od 0,8% (epruveta Z-3-2) do 3,5% (epruveta Z-3-1), dok je kod vrednosti modula elastičnosti uočeno rasipanje rezultata koje se kreće u granicama od 0,9% (epruveta Z-3-2) do 5,0% (epruveta Z-3-1).

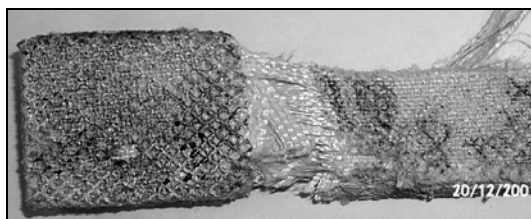
Rasipanje pojedinih rezultata se može objasniti jednostavnom tehnologijom izrade materijala (ručnom metodom u uređaju za toplo presovanje).

Razumevanje mikromehanizma oštećenja u kompozitnim materijalima koji se javljaju u toku delovanja opterećenja je od velikog značaja jer detaljno poznavanje ovih mehanizama doprinosi sveobuhvatnijem poznavanju ispitivanog materijala. S obzirom da ovaj rad predstavlja deo karakterizacije novo izvedenog materijala, neophodno je bilo izvesti i mikromehaničku analizu kako bi se uočili svi prateći mehanizmi tokom oštećenja i loma, što će i biti prikazano u narednom delu rada. Analiza je izvedena na osnovu loma ojačavajućeg sloja koji zahvaljujući svojim secifičnostima dovodi do različitih modela iniciranja prsline i njenog daljeg rasta. Specifičnost se ogleda u različitoj isprepletanosti vlakana u tkaninama i samim tim različitoj raspodeli napona duž ose vlakana tako da ona nisu opterećena isto. Kao posledica neravnomerne raspodele javlja se različito vremensko pucanje vlakana, što dovodi do pojave lokalnih smicajnih napona uz pokidano vlakno u zoni loma. Povećanjem ovih napona dolazi do delaminacije, tj. do pucanja veze vlakno-matrica i prsline nastala lomom vlakana raste duž susednih vlakana i izaziva makroprslinu. Rezultat toga je i lokalno raslojavanje i pucanje vlakana, ali kompozit i dalje nosi spoljašnje opterećenje. Sa porastom napona lokalna oštećenja se šire i do konačnog loma je dolazilo uz akustični efekat kao posledica pucanja velikog broja vlakana.

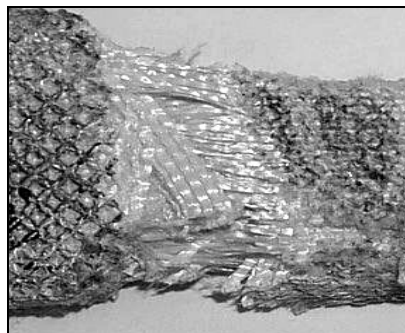
Tipični izgled preloma epruveta ispitivanih na zatezanje i prelomne površine su prikazane na slikama 3, 4 i 5.



Slika 3 - Izgled epruvete Z-2-1 ispitivane zatezanjem
Figure 3 – A view of tension test specimen Z-2-1

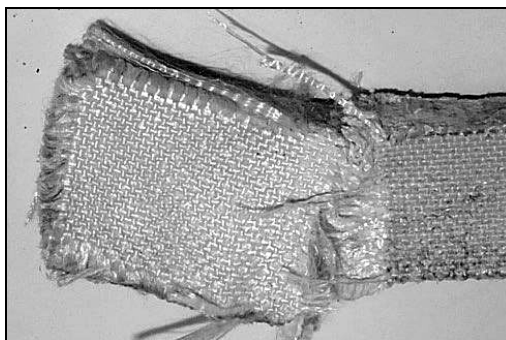


Slika 4 - Izgled prelomne površine epruvete Z-2-1 pri uvećanju x150
Figure 4 - A view of tension test specimen Z-2-1 crack surface with enlargement x150



Slika 5 - Izgled prelomne površina epruvete Z-2-1 pri uvećanju x200
Figure 5 - A view of tension test specimen Z-2-1 crack surface with enlargement x200

Tokom svih ispitivanja uočljiva je bila pojava vidnog izvlačenja vlakana iz pletenica tkanja (slika 6).



Slika 6 - Izvlačenje vlakana iz pletenica tkanja kod ispitivanog uzorka Z-4-4
Figure 6 – Fiber pull-out from glass woven for test specimen Z-4-4

Na osnovu prethodne analize i prikazanih fotografija može se zaključiti da nastanak kritičnog naponskog stanja, a samim tim i prsline, je direktno posledica razdvajanja veze vlakno–matrica nakon čega dolazi do pucanja vlakna. Lom je kod svih ispitivanih uzoraka bio iniciran od strane spoljašnjeg sloja vlakana koji se više deformišu i dovode do raslojavanja, a samim tim ubrzavaju konačni lom uzoraka. Vlakna nisu pucala po tačno određenim ravnicama već pod uglom od približno 45° , što govori o dominantnim smicajnim komponentama napona.

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. U ovom radu je izvedeno ispitivanje na novom laminarnom polimernom kompozitnom materijalu sa Kevlar 129 tkanjem kao ojačanjem i poli(vinilbutiralom) kao matricom proizvedenom u laboratorijama Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu. Izvedena su standardna zatezna ispitivanja i nakon toga mikromehanička analiza. Mehanička svojstva ispitivanog materijala dobijenih zatezanjem pokazuju malo rasipanje rezultata oko srednjih vrednosti ($R_{msr}=477,6$ MPa, $E_{sr} = 135,1$ GPa). Kod zatezne čvrstoće ono se kreće u granicama od 2,1% (eproveta serija Z-2) do 7,8% (eproveta serije Z-3), dok je kod vrednosti modula elastičnosti uočeno nešto veće rasipanje rezultata koje se kreće u granicama od 3,0% (eproveta serije Z-1) do 18,0% (eproveta serije Z-3). Rasipanje pojedinih rezultata se može objasniti krajnje jednostavnom tehnologijom izrade ispitivanog materijala.

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 pletenica vlakana iz tkanine, a pod uvećanjem i pucanje vlaka na pod uglom od 45° .

Na kraju, treba se reći da se izvedenim eksperimentalnim ispitivanjima i mikrostrukturnom analizom došlo do dragocenih podataka koji predstavljaju jedan od elemenata za potpunu karakterizaciju ispitivanog materijala.

LITERATURA

- [1] L. N. Philips, "Desing with Advanced Composite Materials", London, (1980).
- [2] K. K. Chawia, "Composite Materials", Springer-Verlag, New York,
- [3] M. M. Schwartz, "Composites Materials handbook", McGraw-Hill, inc, USA, (1984).
- [4] I. Živković, "Udarna žilavost slojevitih kompozitnih materijala poliamidno vlakno poli(vinilbutiral)", magistarski rad, Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu, (2002).
- [5] ASTM D3039-76, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites", Annual Book of ASTM Standard, Vol.36, p.734-739, (1980).