

## UTICAJ ORIJENTACIJE VLAKANA NA UDARNU ŽILAVOST I OSOBINE LOMA KOMPOZITA UGLJENIČNA VLAKNA - EPOKSI SMOLA

### THE EFFECT OF FIBER ORIENTATION ON IMPACT TOUGHNESS AND FRACTURE PROPERTIES OF CARBON FIBER-EPOXY COMPOSITE

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK /UDC: 620.178.7:[678.686-1:661.666

Rad primljen / Paper received: 5.12.2001.

Adresa autora / Author's address:

<sup>(1)</sup> Vojnotehnički institut, Beograd

<sup>(2)</sup> Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

<sup>(3)</sup> Institut za ispitivanje materijala, Beograd

#### Ključne reči

- kompozit
- ugljenična vlakna
- epoksi smola
- orijentacija vlakana
- udarno ispitivanje
- faktor intenziteta napona

#### Keywords

- composite
- carbon fibers
- epoxy resin
- fiber orientation
- impact testing
- stress intensity factor

#### IZVOD

Uticaj orijentacije ugljeničnih vlakana u kompozitu sa epoksi matricom na udarnu žilavost i na žilavost loma je eksperimentalno analiziran ispitivanjem Šarpi epruveta sa V zarezom i zarezanih epruveta modifikovanog CT oblika (sa oštrim vrhom zareza koji zamenjuje zamornu prslinu). Epruvete su proizvedene od uzoraka sa orijentacijom vlakana  $[\pm 45]_1 6s$ ,  $[0/90]_1 6s$ , kao i sa kombinovanim sastavom  $[0_2/90/\pm 45/90/0_2]_4s$ .

Epruvete sa V zarezom su ispitivane na instrumentiranoj Šarpi mašini, čime je omogućeno razdvajanje energija nastanka i rasta prsline. Faktor intenziteta napona  $K_c$  je izabran kao parametar loma.

Ukupne vrednosti udarne žilavosti su pokazale da  $[0/90]_1 6s$ , kao što je očekivano, daje najveću otpornost na udar, ali su i vrednosti za  $[0_2/90/\pm 45/90/0_2]_4s$  bile zadovoljavajuće, sa pogodnim odnosom energije širenja i energije rasta prsline.

Ispitivanje modifikovane CT epruvete je dalo slične i zadovoljavajuće rezultate za faktor intenziteta napona za dva uzorka ( $[0/90]_1 6s$  i  $[0_2/90/\pm 45/90/0_2]_4s$ ), dok je za treći  $[\pm 45]_1 6s$ , ova vrednost niža za oko 20%.

Imajući na umu druge prednosti orijentacije  $[0_2/90/\pm 45/90/0_2]_4s$ , ona se može preporučiti kao najbolja uprkos nešto nižoj udarnoj energiji.

#### ABSTRACT

The effect of carbon fibers orientation in a composite with epoxy matrix on the impact and fracture toughness is experimentally analyzed by testing of Charpy type V notched specimens and notched specimens of modified CT form (with sharp notch tip as replacement for fatigue pre-crack). Specimens were produced from samples with carbon fiber orientation  $[\pm 45]_1 6s$ ,  $[0/90]_1 6s$ , and also with combined composition  $[0_2/90/\pm 45/90/0_2]_4s$ .

Specimens with V notch have been tested on instrumented Charpy machine, enabling to separate crack initiation and propagation energies. Stress intensity factor  $K_c$  had been selected as fracture parameter.

Total impact toughness values have shown that highest impact resistance belongs to  $[0/90]_1 6s$ , as expected, but the values for  $[0_2/90/\pm 45/90/0_2]_4s$  are also satisfactory, with convenient ratio of crack propagation to crack initiation energies.

Modified CT specimen testing have shown close and satisfactory results for stress intensity factor of two samples ( $[0/90]_1 6s$  and  $[0_2/90/\pm 45/90/0_2]_4s$ ), and for third sample  $[\pm 45]_1 6s$  this value is about 20% lower.

Having in mind other benefits with  $[0_2/90/\pm 45/90/0_2]_4s$ , it can be recommended as superior in spite of somewhat lower impact energy.

#### UVOD

Radi ispunjenja strogih zahteva primene u konstrukciji aviona, razvijeni su kompozitni materijali sa matricom od epoksi smole i ugljeničnim vlaknima kao ojačavačem, koji se smatraju materijalom najnovije generacije [1].

Kombinovanjem dva ili više različitih sastojaka, u fizičkom smislu, mogu se dobiti nove osobine žilavosti i čvrstoće u kompozitnim materijalima. Sastojci zadržavaju svoje početne osobine, dok kompozit treba da sačuva njihove najbolje individualne osobine, ali i da poseduje osobine koje nisu tipične za same sastojke. Izborom pogodnih sastojaka i njihovog

odnosa u strukturi kompozita, zahtevane vrednosti čvrstoće, žilavosti, otpornosti na koroziju i toplotu, provodljivosti ili prigušivanja vibracija se mogu postići iz minimalni utrošak materijala [2].

Osnovna razlika u osobinama matrica i vlakana ukazuje na to da se potrebne karakteristike kompozita mogu postići kombinovanjem njihovih osobina na pravi način, što se na najjednostavniji način postiže orijentacijom vlakana u kompozitu ugljenična vlakna – epoksi smola. Orijetancija vlakana u kompozitu određuje ponašanje konstrukcijskih komponenti u eksploataciji i njihov otkaz zbog loma matrice ili vlakana, ili zbog odvajanja vlakana i matrice.

Karakterizacija mehaničkih osobina kompozitnih materijala je težak zadatak. Pre svega, postavlja se pitanje kako definisati njihove zatezne osobine i osobine žilavosti, i kako primeniti standardne metode ispitivanja, uvedene za homogene materijale. Ovo je naročito slučaj sa lokalnim osobinama, kao što su udarna žilavost i parametri mehanike loma. Žilavost je važna konstrukcijska karakteristika, ali nije je moguće oceniti primenom istog pristupa kao za homogene materijale [3]. Analiza rezultata, dobijenih na osnovu eksperimentalnih ispitivanja, može doprineti boljem razumevanju lokalnih i pojedinačnih osobina složenih konstrukcija, kao što je ispitani kompozit.

## MATERIJALI I EKSPERIMENTI

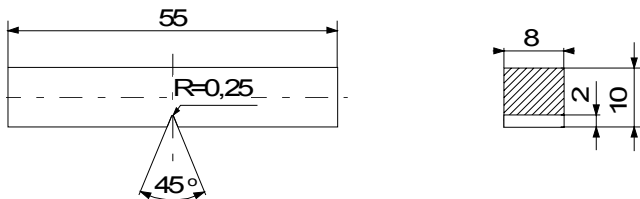
Materijal ispitivan u ovom eksperimentu je kompozit ugljenično vlakno - epoksi smola, proizveden od preprega FIBERDUX NCHR 914/34%132/300 T 300, standardnom procedurom polimerizacije u autoklavima na temperaturi od  $175 \pm 0,5^\circ\text{C}$  [4]. Svaki laminat sastojao se od 64 sloja, ukupne debljine 8 mm.

Pripremljena se tri kompleta uzoraka, u zavistnosti od rasporeda pravaca vlakana i slojeva u kompozitu:

- ◆ I komplet - uzorak A sa rasporedom -  $[\pm 45]_{16S}$ ,
- ◆ II komplet - uzorak B sa rasporedom -  $[0/90]_{16S}$
- ◆ III komplet - uzorak C sa rasporedom -  $[0_2/90/\pm 45/90/0_2]_{4S}$ .

Udarno ispitivanje je izvedeno sa Šarpi V epruvtom, debljine 8 mm (sl. 1), na instrumentiranoj mašini SCHENCK TREBEL 150 J, na sobnoj temperaturi, prema standardu ASTM E23-86.

Radi ocene odgovora materijala kompozita na koncentraciju napona pripremljene su kompaktne epruvete za zatezanje (CT) u skladu sa ASTM E399, sa izuzetkom zamorne prsline (sl. 2). Umesto zamorne prsline, izveden je veoma oštar zarez širine 0,1 mm pomoću dijamantske testere. Faktor intenziteta napona  $K_c$  na vrhu zareza se određuje procedurom definisanom u ASTM E399. Ispitivanje je izvedeno na sobnoj temperaturi na električno-mehaničkoj mašini SCHENCK TREBEL RM 100. Otvaranje prsline (crack opening displacement - COD) je praćeno pomoću merača DD1, sa tačnošću od  $\pm 0,001$  mm, postavljenim sa strane epruvete, kao što je prikazano na sl. 2. Da bi brzine otvaranja prsline bila konstantna, ispitivanje se izvodi u kontroli COD.

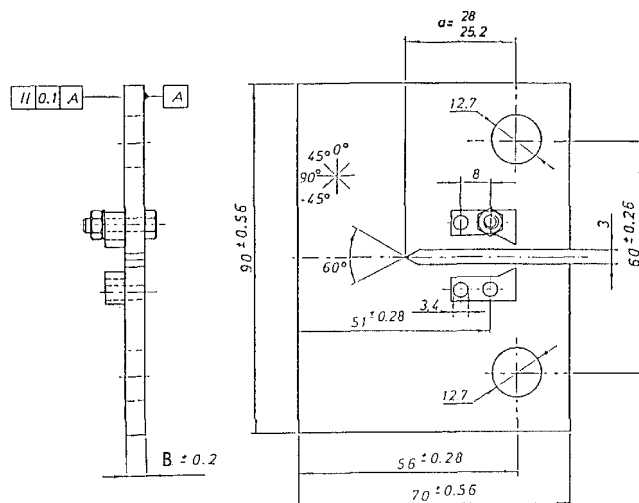


Slika 1. Šarpi epruveta sa V zarezom za udarno ispitivanje savijanjem

## REZULTATI UDARNOG ISPITIVANJA

Tipične zavisnosti sila - vreme, dobijeni udarnim ispitivanjem na instrumentiranom klatnu, su dati na sl. 3. za Šarpi V epruvtu A1, na sl. 4 za epruvtu B1, i na sl. 5 za epruvtu C1. Dobijeni rezultati udarnog ispitivanja za ukupnu energiju i njene komponente za nastanak i rast, zajedno sa vrednostima ugiba, su dati u tab. 1.

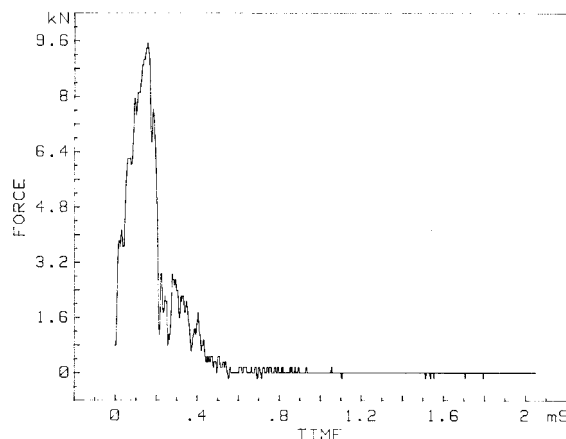
Zahvaljujući ovim podacima, moguće je proceniti ponašanje pri lomu uzoraka u kojima već postoje greške tipa zarez za ili prsline. Pored toga, kapacitet materijala koji će biti deformisan u ispitivanju savijanja, je značajna karakteristika za ponašanje materijala pod opterećenjem.



Slika 2. Modifikovana CT epruveta sa vrhom zareza širine 0,1 mm i meračem otvaranja prsline postavljenim sa jedne strane (dužina zareza  $a = 28$  mm za epruvete A i C, i  $a = 25,2$  mm za epruvtu B)

Svi dijagrami sila - vreme za epruvete za udarno ispitivanje pokazali su brojne skokove koji su nastajali u zavisnosti od rasporeda kompozita. Posle maksimalne sile, opterećenje se smanjivalo u stepenastim skokovima. Najveća maksimalna sila je nađena za epruvtu A (9,6 kN), a najmanja za epruvtu C (6,4 kN), dok je srednja za epruvtu B (8 kN). Kapacitet zaustavljanja prsline je jasno vidljiv na dijagramu epruvete C, nešto umanjen za epruvtu B i slabo izražen za epruvtu A.

Tokom udarnog ispitivanja, epruvete su bile potpuno uništene razdvajanjem na male delovima, sa značajnim raslojavanjem (delaminacijom).

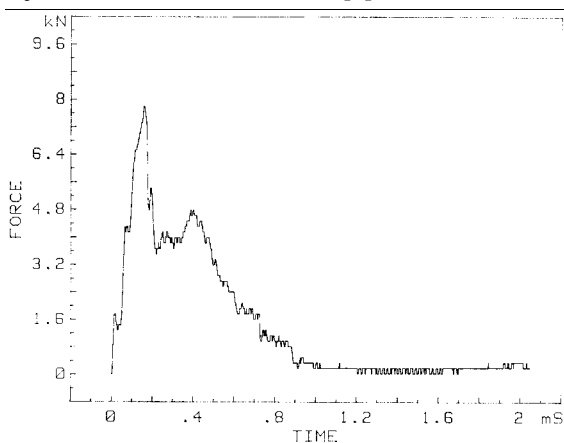


Slika 3. Dijagram sila (FORCE) - vreme (TIME) za epruvtu A1

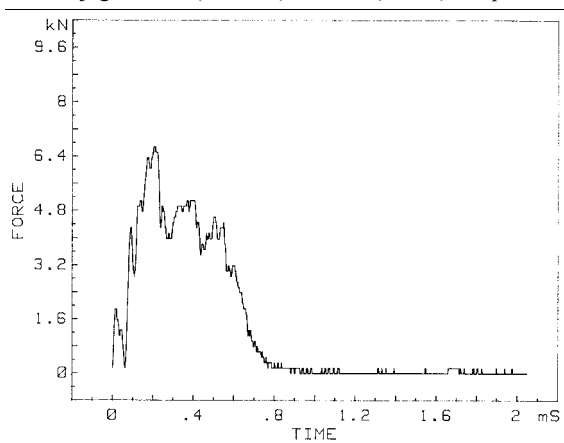
## REZULTATI ISPITIVANJA KOMPAKTNIH EPRUVETA ZA ZATEZANJE (CT)

Tipični dijagrami sila  $P$  - otvaranje prsline COD, dobijeni pomoću statički opterećenih modifikovanih CT epruveta, su dati na sl. 6. do 8. Dobijeni rezultati faktora intenziteta napona su dati u tab. 2.

Za CT epruvetu izrađenu od uzorka A, ( $[\pm 45]_{16s}$ ), kriva sila - COD (sl. 6) je u početku prava, sa izvesnim zakošenjem na oko 40-45% maksimalnog opterećenja. Prvi pad opterećenja, koji se javio pri sili  $P_i$ , uzet je kao kritičan, i pripisan je raslojavanju. Prslina se širi lomom kroz matricu duž pravca  $-45^\circ$  i lomom vlakana duž pravca  $+45^\circ$ , pošto je postignuta maksimalna sila  $P_{max}$ , sa opštom putanjom loma u vidu zuba testere [5].



Slika 4. Dijagram sila (FORCE) - vreme (TIME) za epruvetu B1



Slika 5. Dijagram sila (FORCE) - vreme (TIME) za epruvetu C1

Tabela 1. Rezultati instrumentiranog udarnog ispitivanja kompozitnih epruveta

Uzorak	Epruveta	Ukupna energija, $E_t$ , J	Energija nastanka prsline, $E_{ip}$ , J	Energija rasta prsline, $E_{pr}$ , J	Ugib $D_f$ , mm
UA	1	11,6	4,8	6,8	2,5
	2	10,5	4,4	6,1	2,4
	3	12,3	5,2	7,1	2,7
UB	1	20,9	4,5	16,4	4,8
	2	24,8	5,3	19,5	4,9
	3	22,5	5,1	17,4	4,8
UC	1	16,1	2,6	13,5	3,9
	2	19,7	3,7	16,0	4,0
	3	17,5	3,4	14,1	3,6

Oblik dijagrama za CT epruvetu uzorka B (sl. 7) je sličan prethodnom; samo što je maksimalna sila praćena trenutnim padom opterećenja. U ovom slučaju, dominantan uticaj ima lom vlakana. Očekivano, najveće maksimalno opterećenje se javlja za epruvete uzorka B. Deo stabilnog rasta

prsline je izražen za epruvete uzorka C (sl. 8), zbog složenog rasporeda i doprinosa matičnog loma i raslojavanja.

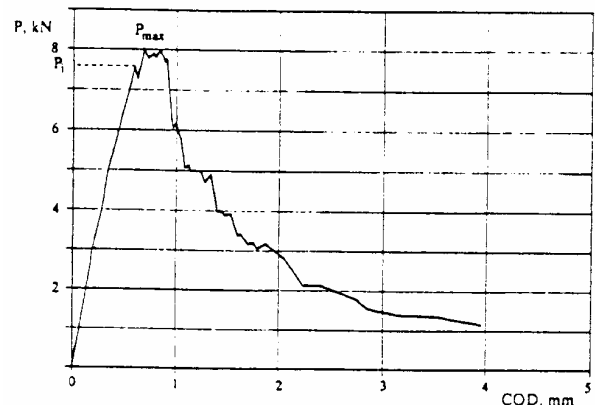
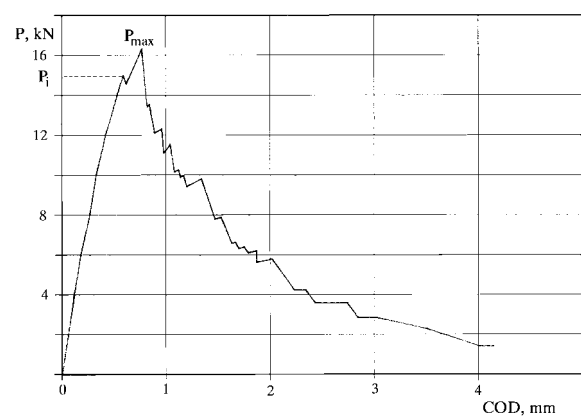
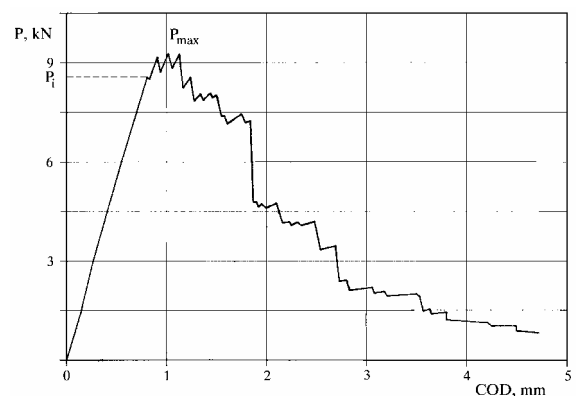
Slika 6. Dijagram sila  $P$  - otvaranje prsline COD za epruvetu A1Slika 7. Dijagram sila  $P$  - otvaranje prsline COD za epruvetu B1Slika 8. Dijagram sila  $P$  - otvaranje prsline COD za epruvetu C1

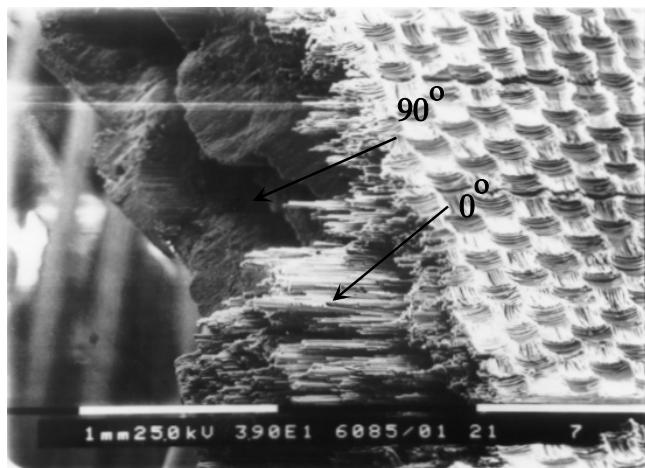
Tabela 2. Rezultati za faktor intenziteta napona, dobijeni ispitivanjem kompozita ugljenična vlakna - epoksi smola

Raspored slojeva Epruveta	Faktor intenziteta napona, $K_{Ic}$ , MPa $\sqrt{m}$	
$[\pm 45]_{16s}$	A-1	31,6
	A-2	32,1
	A-3	29,7
$[0/90]_{16s}$	B-1	36,8
	B-2	37,5
	B-3	36,4
$[0_2/90/\pm 45/90/0_2]_{4s}$	C-1	35,6
	C-2	36,5
	C-3	37,2

## DISKUSIJA

Tipičan konačni lom Šarpi epruvete, izrađene od uzorka B (sлагanje  $[0/90]_{16s}$ ), nađen u jednom od segmenata epruvete, razorene pri udarnom ispitivanju, je prikazan na sl. 9. Pravac opterećenja je normalan na vlakna sa pravcem  $0^\circ$ . Lom oko zarezta objedinio je lom matrice u pravcu vlakana, i istovremeno nastalo raslojavanje, pored najvažnijeg, loma normalnih vlakana. Lom vlakana se javljao kontinualno, jer je čvrstoća vlakana sprečila trenutni totalni lom, što se odražava na oblik dijagrama. Ovakav proces loma doprinosi većoj energiji rasta prsline u odnosu na energiju nastanka prsline (tab. 1).

Najbolja udarna žilavost je nađena za epruvete B, zajedno sa najvećim vrednostima ugiba, skoro dva puta većim u poređenju sa epruvetom A. Ovakav rezultat je očekivan, imajući na umu raspored vlakana. Udarne energija složenog rasporeda vlakana u epruveti C je zadovoljavajuća. Interesantno je napomenuti da je energija nastanka prsline za epruvete A i B ista, dok je za epruvetu C znatno manja. Ovo se može dovesti u vezu sa sadržajem matrice u kompozitu. Međutim, energija udara se mora razmatrati istovremeno sa zateznim osobinama, i u ovom slučaju zbirne osobine uzorka C su u prednosti u odnosu i na uzorak A i na uzorak B.

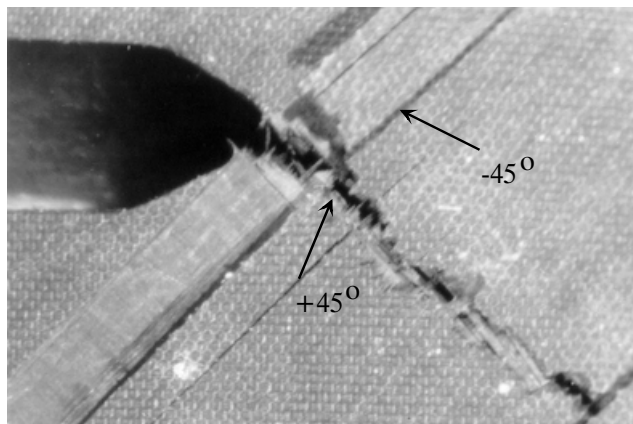


Slika 9. Tipičan lom, nađen u jednom segmentu Šarpi epruvete uzorka B, razorene pri udarnom ispitivanju

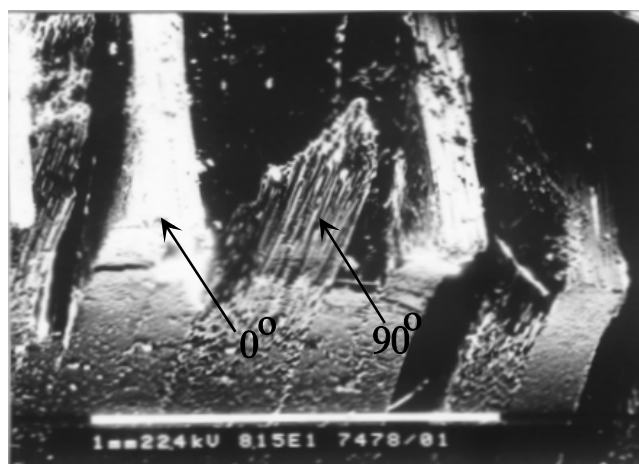
Početni deo dijagrama sila - COD (sl. 5) za određivanje faktora intenziteta napona uzorka A (raspored  $[\pm 45]_{16s}$ ) je karakterisan blagim smanjenjem pada, za oko 40%, maksimalnog opterećenja, što je posledica početnog matričnog loma u slojevima  $\pm 45^\circ$  i raslojavanja duž vlakana. Prvi značajniji pad sile je uočen na nivou  $P_i$ , i ovaj skok se uzima kao kritičan za proračun faktora intenziteta napona. Pri maksimalnoj sili, skokovi su se javljali na nekom platou, ukazujući na sposobnost kompozita da izdrži to opterećenje. Posle maksimalne sile, skokovi su sve izraženiji, što pokazuje da se lom vlakana odvija u jednoj ravni ( $-45^\circ$ ), a raslojavanje u drugoj ( $+45^\circ$ ). Ovaj proces se ponavlja, i konačan izgled je testerasti oblik, sl. 10.

Dijagram sila - COD za epruvetu B ne pokazuje plateau ili skokove pri maksimalnoj sili, ali se zato javlja iznenađan pad sile. Doprinos matričnog loma i raslojavanja je zamenljiv za otpornost prema rastu prsline u poređenju sa

otpornošću vlakana na lom. Tipičan lom CT epruvete B je dat na sl. 11. Lom ovih epruveta se posmatra kao lom vlakana, praćen matričnim lomom i raslojavanjem.



Slika 10. Tipično oštećenje CT epruvete s sлагanjem  $[\pm 45]_{16s}$



Slika 11. Tipičan lom CT epruvete B sa sлагanjem  $[0/90]_{16s}$ , 81,5x

Složen raspored u uzorku C doprinosi dobroj otpornosti na lom, ponovo sa platom skokova pri maksimalnoj sili, zbog matričnog loma i raslojavanja u slojevima  $90^\circ$  i  $45^\circ$ .

Dobijeni faktori intenziteta napona su slične vrednosti za epruvete B i C, dok su za epruvetu A ove vrednosti za oko 20% manje.

Kritično opterećenje  $P_i$  se u svim slučajevima može pripisati početnom lomu vlakana, uz već postojeći matrični lom i raslojavanje. Ovo je praćeno povećanjem dužine prsline i smanjenjem popuštanja epruvete. Sledeći skokovi na krivoj su posledica rasta prsline. Na ovim mestima se indukuje lokalni napon klizanja, koji prouzrokuje koncentraciju zateznog napona. Čvrstoća veze vlakno - matrica je manja u odnosu na napon klizanja, kontakt između matrice i vlakna se prekida, i prsline će nastati duž vlakna, npr. doći će do konačnog kidanja veze i loma epruvete [6]. Može se zaključiti da prvi skok za silu,  $P_i$ , odgovara nastanku opisanog loma epruvete i predstavlja kritično opterećenje za ocenu faktora intenziteta napona.

Generalno, epruveta uzorka C je karakterisana najboljom kombinacijom osobina pri udarnom ispitivanju, zbog visokog odnosa energije nastanka prsline prema energiji rasta, i žilavosti loma. Uticaj plastičnih komponenti loma (matrični

lom i raslojavanje) u poređenju sa krutom komponentom (lom vlakana) je najizraženiji.

Treba primetiti da se epruvete nisu potpuno raspale tokom ispitivanja žilavosti loma. Daljim opterećivanjem, javio se spor i stabilan rast prsline, i opterećenje se stepenasto smanjilo, kao na sl. 10.

#### ZAKLJUČAK

Pravac ugljeničnih vlakana u kompozitu sa matricom od epoksi smole utiče na žilavost kompozita, kao što je uočeno tokom udarnih ispitivanja i ispitivanja mehanike loma. Maksimalna žilavost, izražena energijom udara Šarpijevih epruveta i kritičnim faktorom intenziteta napona modifikovanih CT epruveta, je dobijena iz uzorka B ( $[0/90]_{16s}$ ), dok su minimalne vrednosti dobijene iz uzorka A ( $[\pm 45]_{16s}$ ). Raspored slaganje u uzorku C ( $[0_2/90/\pm 45/90/0_2]_{16s}$ ) može se preporučiti za proizvodnju komponenata, zato što je

iskazao veliku žilavost, blisku žilavosti uzorka B, pri čemu su druge osobine izraženije zbog rasporeda.

Pri konstruisanju komponenata sa matricom od epoksi smole i ugljeničnim vlaknima kao ojačavačem, treba uzeti u obzir da ih udarno opterećenje može uništiti, kao što se desilo tokom ovog ispitivanja.

#### LITERATURA

1. Harrington, A., Reed, J. (1986). A Look into The Next Decade, Armade International, 7, pp. 6.
2. Авиационная Техника (1995). Вол.3, 26-34
3. Jones, M. R. (1998). Mechanics of composite materials, McGraw-Hill, New York, pp.121.
4. Greeley, B. M. (1997). Aviation Week and Space Technology, 3, pp.78.
5. Burzic, Z. (1990). Magistarska teza, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
6. Фуджий, Т., Дзака, М. (1992), Механика разрушения композиционных материалов, Москва

## MT-KOMEX d.o.o.

Preduzeće za proizvodnju, promet i usluge

### Peći za sušenje elektroda:



#### Tip MT-100

##### Tehnički podaci :

1. Dimenzije : 790 x 600 x 650 mm
2. Sušenje se obavlja uz prirodnu cirkulaciju vrelag vazduha
3. Temperatura sušenja do 400°C
4. Proces sušenja vodi elektronski termoregulator sa očitavanjem temperature na displeju
5. Kapacitet do 100 kg elektroda
6. U komori se može sušiti prah za EPP postupak
7. Snaga uređaja 5 kW
8. Napon 380 V, 50 Hz



#### Tip MT-20

##### Tehnički podaci :

1. Dimenzije : 220 x 220 x 700 mm
2. Komora je toplotno izolovana
3. Sušenje se obavlja uz prirodnu cirkulaciju vrelag vazduha
4. Temperatura sušenja do 300°C
5. Proces sušenja je automatizovan
6. Kapacitet do 20 kg elektroda
7. Snaga uređaja 1.65 kW
8. Napon 220 V, 50 Hz



#### Tobolac

##### Tehnički podaci :

1. Sušenje se obavlja uz prirodnu cirkulaciju vrelag vazduha
2. Kapacitet do 10 kg elektroda
3. Snaga uređaja 150 W
4. Napon 75 V, (uređaj radi na zavarivačkom naponu aparata za zavarivanje)

#### Delatnost preduzeća u oblasti zavarivanja

- Servis i rezervni delovi svih proizvođača opreme za zavarivanje
- Proizvodnja uređaja i rezervnih delova
- Reparaturno zavarivanje u svim postupcima
- Iznajmljivanje aparata za MIG/MAG zavarivanje