

## Mehanička svojstva staklo/PET kompozita iz pletenih predoblika - utjecaj finoće pređe

Prof.dr.sc. **Goran Demboski**, dipl.ing.

Prof.dr.sc. **Gordana Bogoeva-Gaceva**, dipl.ing.

Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet "Sv. Kiril i Metodij"  
Skopje, Makedonija

e-mail: goran@tmf.ukim.edu.mk

Prispjelo 09.02.2007.

UDK 677.017:677.075.13

Izvorni znanstveni rad

*Ispitivan je utjecaj finoće pređe na mehanička svojstva staklo/PET termoplastičnih kompozita od kulirnih pletenih predoblika. Primijenjeni su teoretski modeli modula i čvrstoće istezanja za ispitivane kompozite. S povećanjem finoće pređe postiže se manja varijacija svojstava kompozita. Teoretski i eksperimentalni rezultati modula i čvrstoće istezanja kompozita pokazuju sličan trend promjene mehaničkih svojstava s promjenom finoće pređe. Razlika između teoretskih i eksperimentalnih rezultata je najmanja kod kompozita s najfinijom pređom.*

**Ključne riječi:** staklo/PET kompoziti, desno-desna kulirna pletiva, mehanička svojstva, utjecaj finoće pređe

### 1. Uvod

Jedinstvene karakteristike kulirnih pletiva kao što su: fleksibilnost strukture, mogućnost dobivanja trodimenzionalnih bešavnih oblika, odlična udarna čvrstoća, te visoka sposobnost oblikovanja, su razlog značajnih istraživanja u području primjene kulirnih struktura za ojačavanje kompozita [1]. Potreba za tehničkim proizvodima s karakteristikama koje imaju kulirna pletiva, potaknula je značajan razvoj tehnologije ravnog pletenja. Kao rezultat svega toga, danas, na proizvodnju tehničkog tekstila iz kulirnih pletiva otpada oko 9% ukupne potrošnje vlakana za tehničke tekstilije [2]. Osim oblikovanja integralnim pletenjem [3], postoji mogućnost oblikovanja kompozita prešanjem u kalupima (engl. deep drawing), postupak gdje se pletivo postavlja između modeliranih kalupa i oblikuje prema obliku kalupa [4]. Ova tehnika se često upotrebljava za proizvodnju dijelova za automobilsku i avioindustriju.

Jedan od načina dobivanja kompozita je impregniranje tekstilne strukture rastopljenom smolom, odnosno smolastom masom. Najčešće se upotrebljavaju termoreaktivne poliesterne ili epoksidne smole. Ipak,

ekološka i ekonomična proizvodnja termoplastičnih kompozita se temeljiti na polimernim matricama, koje se ugrađuju u tekstilnu strukturu u fazi izrade tekstilnih predoblika [5].

Specifična struktura pletiva, s međusobno povezanim očicama zakrivljene strukture, koje se mogu lako oblikovati, doprinosi velikoj sposobnosti oblikovanja strukture, što je vrlo traženo svojstvo kulirnih pletiva. Pritom, pletiva mogu oblikovati dvostruko zakrivljene površine bez nabora. Međutim zbog velike sposobnosti oblikovanja, odnosno istezljivosti pletiva, djelovanje sile se koncentrira na matricu prije nego što se prenese na ojačavajuća vlakna, što rezultira slabijim mehaničkim svojstvima kompozita na savijanje i istezanje. To nastaje zbog zakrivljene strukture pređe u očici, ograničenog udjela ojačavajućih vlakana u kompozitu i orijentacija vlakana izvan ravnine pletiva [6].

Istraživanja povećanja čvrstoće kompozita ojačanih kulirnim strukturama su pokazala da uvođenje orijentiranih pređa u strukturu pletiva [7, 8] i predistezanje predoblika [9] pozitivno utiče na čvrstoću kompozita. Struktura prepletaja

[10], odabir hibridne pređe [11] i međufazna granica [12], također utječu na mehanička svojstva kompozita.

U prethodnom radu ispitivan utjecaj obrade vlakana na mehanička svojstva kompozita [13]. Cilj ovoga rada je ispitivanje utjecaja finoće pređe na mehanička svojstva staklo/PET kompozita od pletenih predoblika.

### 2. Eksperimentalni dio

Kulirni pleteni predoblici proizvedeni su za izradu kompozita. Korišten je postranični tip hibridne pređe (SBS - side by side), u kojoj je termoplastična PET pređa matrica, a staklena pređa E tipa ojačivač. Za ispitivanje utjecaja finoće pređe na mehanička svojstva kompozita, za proizvodnju pletiva upotrijebljene su pređe različite finoće, ali jednakih udjela matrice i ojačivača. Tehničke karakteristike pletiva su date u tab.1.

Finoća hibridne pređe pletiva bila je od 56 do 482 tex, a pletene su na pletaćim strojevima različitih finoća, tab.1, te su oblikovani kulirni pleteni predoblici površinskih masa od 374 do 1 573 g/m<sup>2</sup>.

Tab.1 Tehničke karakteristike staklo/PET pletenih desno-desnih kulirnih predoblika

Uzorak	A	B	C	D
Finoća staklene pređe (tex)	272	136	68	34
Finoća PET pređe (tex)	210	106,7	52	22
Finoća hibridne pređe (tex)	482	242,7	120	56
Horizontalna gustoća pletiva (cm <sup>-1</sup> )	2,7	3,45	3,3	5,25
Vertikalna gustoća pletiva (cm <sup>-1</sup> )	5,5	7,7	8,1	12,3
Koeficijent gustoće pletiva	0,49	0,45	0,41	0,43
Površinska masa pletiva (gm <sup>-2</sup> )	1573	1108	538	374
Finoća stroja (NoE)	5	8*	8	12
Staklo/PET volumni udio	41/59	41/59	41,5/58,5	46/54
Staklo/PET maseni udeo	56/44	56/44	57/43	61/39
Broj slojeva pletiva u kompozitu	2	3	7	10

\* svaka druga igla na obe iglenice je isključena

Koeficijent gustoće pletiva se kreće od 0,41 do 0,49, što znači da je dobijen sličan oblik očice kod svih pletiva.

U sljedećoj fazi, predoblici su učvršćeni u kompozite termoprešanjem na poluindustrijskoj preši tipa Triulzi-100, uz uvjete učvršćenja: temperatura 270 °C, pritisak 3 MPa u vremenu od 5 min. Da bi se dobila približno jednaka debljina kompozita (≈2 mm), variran je broj slojeva predoblika u kompozitu. Tako kompozit iz predoblika A (pletivo najmanje površinske mase) ima deset slojeva, dok D (pletivo najveće površinske mase) ima dva sloja.

Kod gotovih kompozita je ispitivana čvrstoća savijanja prema ISO R 527 i čvrstoća istezanja prema ISO 178. Uzorci su ispitivani u smjeru nizova (0°) i smjeru redova (90 °C). Najmanji broj ispitivanih uzoraka je pet u svakom smjeru. Ispitivanja savijanja i istezanja su izvedena na dinamometru tipa Schenk Hydroplus PSB250 kN.

### 3. Rezultati i rasprava

U tab.2. su prikazani rezultati ispitivanja čvrstoće i modula savijanja kompozita.

Iz rezultata ispitivanja na savijanje, uočava se da se povećanjem finoće pređe pletenih predoblika od 482 do 56 tex značajno povećava čvrstoća i modul savijanja kompozita u oba smjera ispitivanja. Kompozit s najfinijom pređom (D) ima otprilike tri puta veću čvrstoću savijanja u odnosu na kompozit s najgrubljom pređom (A). Zanimljivo je da najveća razlika u povećanju mehaničkih svojstava nastala s pove-

ćanjem finoće pređe od 120 tex (C) na 56 tex (D). Naime, kompozit D ima dva puta veću čvrstoću savijanja u smjeru nizova, u odnosu na kompozit C. U smjeru redova povećanje čvrstoće savijanja s povećanjem finoće pređe nešto je manje.

Modul savijanja također raste s povećanjem finoće pređe. Kompozitima s najgrubljom pređom (A) u odnosu na kompozite s najfinijom pređom (D), povećava se modul savijanja za otprilike dva i pol puta. Kompozit D s najfinijom pređom (56 tex) ima skoro dva puta veći modul savijanja u odnosu na kompozit C s pređom finoće 120 tex.

Isto tako, kod kompozita sa finijom pređom, konstatirane su manje varijacije rezultata. Naime, uzorak A (najgrublja pređa) ima najveće vrijednosti koeficijentata varijacije, tab.2. S povećanjem finoće pređe, opadaju varijacije rezultata (cv). Tako uzorak D (najfinija pređa) ima minimalni koeficijent varijacije od 0,6 do 3,1 (za vrijednosti  $\sigma$ ).

Rezultati ispitivanja čvrstoće i modula istezanja kompozita iz predoblika sa različitom finoćom pređe prikazani su u tab.3.

Kao i kod ispitivanja na savijanje, uzorak A (najgrublja pređa 482 tex) ima najslabija mehanička svojstva

Tab.2 Čvrstoća i modul savijanja staklo/PET kompozita

Uzorak	A		B		C		D	
Finoća pređe	482 tex		242,7 tex		120 tex		56 tex	
	$\bar{x}$	cv	$\bar{x}$	cv	$\bar{x}$	cv	$\bar{x}$	cv
$\sigma$ -0 [MPa]	43,6	13,6	55,8	7,1	65,8	7	133,2	3,1
$\sigma$ -90 [MPa]	36,3	17,6	53	12,2	75,6	9	100,9	0,6
E-0 [MPa]	3 596	15,1	4 354	4,8	4 854	12	9 446	11,7
E-90 [MPa]	2 949	17,8	4 711	12,6	4 893	14,2	7 300	11,1

\*  $\bar{x}$  - srednja vrednost, cv - koeficijent varijacije,  $\sigma$ -0 - čvrstoća savijanja kompozita u smjeru nizova,  $\sigma$ -90 - čvrstoća savijanja kompozita u smjeru redova, E-0 - modul savijanja kompozita u smjeru nizova, E-90 - modul savijanja kompozita u smjeru redova

Tab.3 Čvrstoća i modul istazanja staklo/PET kompozita

Uzorak	A		B		C		D	
Finoća prede (tex)	482 tex		242.7 tex		120 tex		56 tex	
	$\bar{x}$	cv	$\bar{x}$	cv	$\bar{x}$	cv	$\bar{x}$	cv
$\sigma_0$ [MPa]	22,7	15,2	29,5	8,5	37,2	8,1	65,7	2,2
$\sigma_{90}$ [MPa]	23,9	18,7	20,3	13,2	38,8	4,2	58,4	4,8
E-0 [MPa]	3,802	14,5	4,451	5,7	4,342	9	7,160	5,5
E-90 [MPa]	3,365	19,7	3,021	14,7	4,918	13,7	6,628	2,7

i najveću varijaciju rezultata, dok uzorak D od najfinije prede (56 tex) ima najveće vrijednosti čvrstoće i modula istazanja a najmanji koeficijent varijacije. Znači, sa smanjenjem duljinske mase prede rasipanje rezultata se smanjuje. Kod uzorka D, koeficijent varijacije čvrstoće i modula se kreće od 2,2 do 5,5%, dok se kod uzorka A (najgrublja preda) kreće od 14,5 do 19,7%.

Usporedba rezultatata ispitivanja na savijanje i istezanje kompozita potvrđuje pravilo da se kod kompozita od kulirnih pletiva dobivaju veće vrijednosti čvrstoće savijanja u odnosu na čvrstoću istezanja. Ovakvo ponašanje je rezultat je 3-D orijentacije prede koja izlazi iz ravnine (out of plane) u pletenoj strukturi, što većim vrijednostima otpornosti na savijanje [14].

Radi provjere dobivenih rezultata povećanja mehaničkih svojstava kompozita kao rezultata primjene finije prede, upoređeni su eksperimentalni rezultati mjerenja s rezultatima dobivenim na bazi teoretskih modela određivanja mehaničkih svojstava kompozita iz kulirnih predoblika.

### 3.1. Teoretski model izračuna modula istezanja kompozita

Jedan od najčešće korištenih modela za predviđanje elastičnih svojstava kompozita je tzv. zakon o mješavinama (rule of mixtures) [15]. Prema ovom modelu, elastična svojstva kompozita su rezultat udjela elastičnih svojstava ojačivača i matrice (1).

$$E_c = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f \quad (1)$$

gdje su:  $E_c$  - modul elastičnosti kompozita,  $E_m$  - modul elastičnosti matrice,  $V_m$  - volumni udio matrice u kompozitu,  $E_f$  - modul elastičnosti ojačivača,  $V_f$  volumni udio ojačivača u kompozitu.

Ovaj model pretpostavlja idealni kompozit čija su svojstva zbirna svojstva matrice i ojačivača. Nedostak modela je što ne uzima u obzir interakciju između ojačivača i matrice u kompozitu. Unatoč ovom pojednostavnjenju, model daje dobre rezultate, posebno u predviđanju elastičnih svojstava usmjerenih kompozita odnosno tzv. unidirekcionalnih (UD) kompozita, gdje je ojačivač postavljen pravocrtno i to u smjeru ispitivanja [15]. Kako bi se omogućila primjena zakona o mješavinama, uzima se da je efikasnost ojačivača kod UD kompozita 1 (odnosno 100%). Prepreka primjeni ovog modela za kompozite ojačane kulirnom strukturom je zakrivljena struktura očice kao osnovne jedinice konstrukcije pletiva. Da bi se omogućila primjena zakona o mješavinama u predviđanju elastičnih svojstava kompozita ojačanih kulirnim pletivima, **C.D. Rudd** i sur. [16], a kasnije i **S. Ramakrishna** [17], kombiniraju model Krenchela i poznati zakon o mješavinama. Prema njima, elastična svojstva kompozita ojačanih vlaknima geometrije različite od UD strukture, mogu se aproksimirati uvođenjem faktora efikasnosti ojačivača. Efikasnost ojačivača je funkcija orijentacije ojačivača, odnosno njegovog poţaja u kompozitu u odnosu na pravac opterećenja. Kod UD kompozita računna se da je efikasnost ojačivača

jedan, i to ako je ojačivač postavljen u pravcu ispitivanja, a nula ako je postavljen okomito na pravac ispitivanja. Pristup Krenchela [17] tretira predu skupinom paralelnih vlakana i pritom zanemaruje transverzalna izduženja i naprezanja na vlaknu u bilo kojem položaju u odnosu na pravac opterećenja. Pritom se pretpostavlja idealna adhezija između ojačivača i matrice. Naprezanja u ojačivaču se tada računaju kao da se radi o vlaknima orijentiranim paralelno na pravac opterećenja. Efikasnost ojačivača se zatim računa kao odnos naprezanja koja djeluju na ojačavajuća vlakna u smjeru ojačivača i u smjeru ispitivanja. Isto načelo može se primijeniti na skupine paralelnih vlakana različito orijentiranih u kompozitima za izračunavanje ukupne efikasnosti ojačivača zbrajanjem udjela pojedinih skupina. Vrijednost faktora efikasnosti ojačivača ( $\eta$ ) prikazana je izrazom (2).

$$\eta = \sum a_n \cos^4 \alpha_n \quad (2)$$

gdje su:  $a_n$  - udio ojačavajućih vlakana u bilo kojem pravcu,  $\alpha_n$  - orijentacija ojačavajućih vlakana u odnosu na pravac opterećenja.

Na sličan način, efikasnost ojačivača zakrivljenog oblika se može izračunati integriranjem izraza za efikasnost po duljini ojačivača (3).

$$\eta = \int a_n \cos^4 \alpha_n dl \quad (3)$$

gdje je  $l$  duljina ojačavajućih vlakana.

Vrijednost efikasnosti ojačivača se zatim može upotrijebiti za izračun modula elastičnosti kompozita primjenom zakona o mješavinama (4).

$$E_c = E_m (1 - V_f) + E_f V_f \eta \quad (4)$$

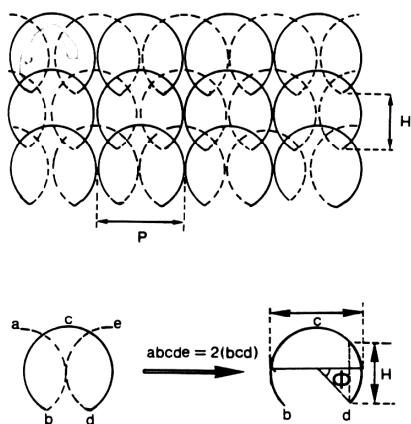
Geometrijski model za desno-desne strukture pletiva [17] prikazan je na sl.1.

Primjena ovog modela podrazumijeva određena pojednostavnjenja:

- očice lica i naličja desno-desne strukture pletiva imaju jednaku geometriju,

- sve očice imaju jednake dimenzije,
- duljina očice za povezivanje lica i naličja je zanemarljiva,
- očice leže u ravnini i dodirne točke očica nemaju 3-D komponentu,
- nema promjene geometrije očica tijekom procesa prešanja ili impregnacije kompozita.

Prema shematskom prikazu na sl.1, radijus očice  $R$  utječe na vrijednost duljine očice  $l$  (5).



Sl.1 Geometrijski model desno-desnog pletiva

$$l = \pi R + 2R\phi \quad (5)$$

gdje su:

$$R = \frac{P}{2} \quad (6)$$

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{H}{P}\right) \quad (7)$$

$P$  - korak očice,  $H$  - visina očice.

Pod pretpostavkom da se ukupna duljina očice može izračunati zbrojem malih linearnih duljina očice  $dl$  postavljene pod kutom  $\theta$  u odnosu na pravac u smjeru opterećenja, efikasnost ojačivača se može izraziti izrazom (8).

$$\eta = \frac{\int_{\theta=-\phi}^{\theta=\pi+\phi} \cos^4 \theta \frac{Rd\theta}{l} \quad (8)$$

Tab.4 Efikasnost ojačivača i parametri desno-desne strukture pletiva

Uzorak	A	B	C	D
P - korak očice (mm)	3,70	2,90	3,03	1,90
H - visina očice (mm)	1,82	1,30	1,23	0,81
Koeficijent gustoće pletiva	0,49	0,45	0,41	0,43
$\eta-0$ - efikasnost ojačivača u smjeru nizova	0,491	0,488	0,484	0,486
$\eta-90$ - efikasnost ojačivača usmjeru redova	0,286	0,291	0,297	0,294

Efikasnost ojačivača kod opterećenja u smjeru nizova (uzdužno) može se izračunati izrazom (9).

$$\eta = \frac{R}{l} \int_{\theta=-\phi}^{\theta=\pi+\phi} \cos^4 \theta d\theta \quad (9)$$

Za efikasnost ojačivača kod opterećenja u smjeru redova (poprečno) može se upotrijebiti izraz (10).

$$\eta = \frac{R}{l} \int_{\theta=-\phi}^{\theta=\pi+\phi} \sin^4 \theta d\theta \quad (10)$$

Efikasnost ojačivača u smjeru nizova i redova, izračunata prema izrazima (9) i (10) prikazana je u tab.4.

Efikasnost ojačivača kod svih ispitivanih uzoraka je slična, ali postoji velika razlika u vrijednostima efikasnosti u smjeru nizova i redova. U smjeru nizova vrijednosti su znatno veće (oko 50%). Najveću efikasnost u smjeru nizova, a najmanju u smjeru redova ima uzorak A, koji ima maksimalnu vrijednost koeficijenta gustoće. Suprotno, najmanju efikasnost u smjeru nizova i najveću u smjeru redova ima uzorak C, koji ima najmanji koeficijent gustoće pletiva. Razlika u efikasnosti ojačivača između pojedinih uzoraka je rezultat različite geometrije očice.

Na sl.2 i 3 su prikazani eksperimentalni i teoretski rezultati modula istezanja kompozita s različitim finoćama pređa u smjeru nizova i redova.

Postoji značajna razlika između teoretskih i eksperimentalnih vrijednosti modula istezanja u oba smjera ispitivanja. Teoretski i eksperimen-

talni rezultati promjene modula istezanja u smjeru nizova s promjenom finoće pređe imaju sličnu tendenciju, ali su teoretski znatno viši, sl.2. U oba slučaja postoji tendencija povećanja vrijednosti modula s povećanjem finoće pređe (uzorci A u odnosu na uzorke D). Kod uzorka C primjećuje se odstupanje od ove tendencije (kod teoretskih rezultata), što može biti rezultat i oblika očice jer ovaj uzorak ima najmanju efikasnost ojačivača u pravcu nizova, tab.4.

Kod ispitivanja u smjeru redova se isto tako javljaju značajne razlike između eksperimentalnih i teoretskih vrijednosti modula, sl.3.

### 3.2. Teoretski model izračuna čvrstoće istezanja kompozita

Čvrstoća kompozita od pletenih predoblika ovisi prije svega o čvrstoći ojačavajuće pređe u dijelovima očice koji premošćuju ravninu kidanja pri istezanju kompozita [18, 19]. Premostivi elementi (bridging elements) koji povezuju ravninu kidanja kompozita su stranice očica (kada sila djeluje u smjeru nizova) i glave očica (kada sila djeluje u smjeru redova), sl.4.

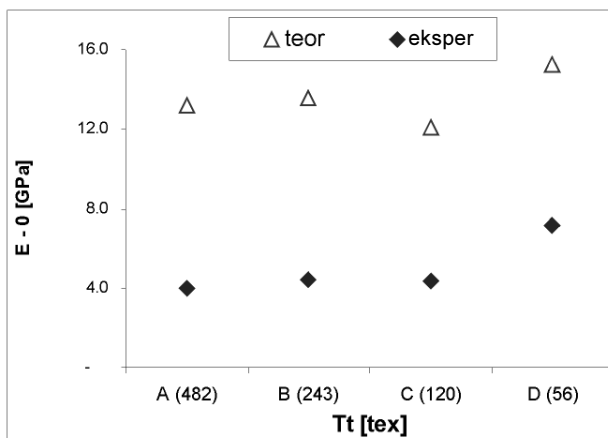
Broj premostivih elemenata B-0, kada sila djeluje u smjeru nizova, određuje se izrazom (11).

$$B-0 = 4 \cdot D_h \cdot n \cdot b \quad (11)$$

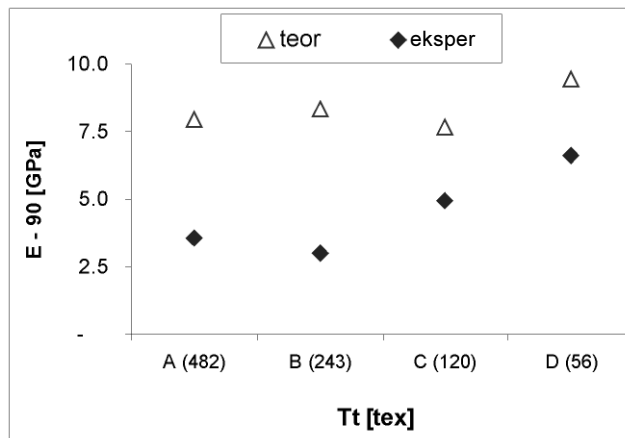
Broj premostivih elemenata B-90 kada sila djeluje u smjeru redova, određuje se izrazom (12).

$$B-90 = D_v \cdot n \cdot b \quad (12)$$

gdje su:  $D_h$  - horizontalna gustoća pletiva,  $D_v$  - vertikalna gustoća pletiva,  $n$  - broj slojeva pletiva u kompozitu,  $b$  - širina ispitivanog uzorka kompozita.



Sl.2 Teoretske i eksperimentalne vrijednosti modula istezanja kompozita u smjeru nizova



Sl.3 Teoretske i eksperimentalne vrijednosti modula istezanja kompozita u smjeru redova

Čvrstoća kompozita u smjeru nizova ( $\sigma-0$ ) i redova ( $\sigma-90$ ) se može izračunati izrazima (13) i (14).

$$\sigma-0 = \frac{B-0 \cdot f_{pr}}{A} \text{ [MPa]} \quad (13)$$

$$\sigma-90 = \frac{B-90 \cdot f_{pr}}{A} \text{ [MPa]} \quad (14)$$

gdje su:  $f_{pr}$  - čvrstoća prede ojačivača,  $A$  - poprečni presjek kompozita.

Zamjenom vrijednosti premostivih elemenata u izraze (13) i (14) dobivaju se krajnji izrazi za izračun čvrstoće istezanja kompozita (15) i (16).

$$\sigma-0 = \frac{4 \cdot D_h \cdot n \cdot b \cdot f_{pr}}{A} \text{ [MPa]} \quad (15)$$

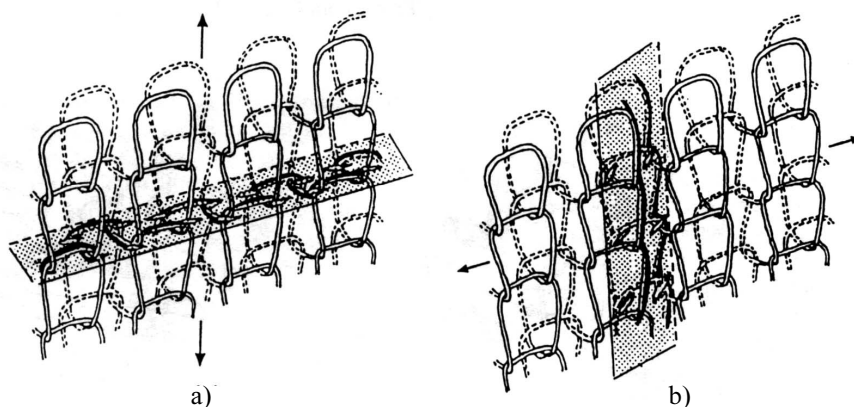
$$\sigma-90 = \frac{D_v \cdot n \cdot b \cdot f_{pr}}{A} \text{ [MPa]} \quad (16)$$

Vrijednosti čvrstoće staklene prede [20] su prikazane u tab.5.

Kao i kod ispitivanja modula, usporedba teoretskih i eksperimentalnih rezultata čvrstoće istezanja u smjeru nizova pokazuje da su teoretske vrijednosti čvrstoće značajno veće od eksperimentalnih. Eksperimentalni i teoretski rezultati imaju istu tendenciju povećanja čvrstoće sa smanjivanjem duljinske mase prede. Izuzetak predstavlja teoretska vrijednost čvrstoće uzorka A, koja je nešto veća u odnosu na uzorak B s predom veće finoće. Uzorak D s najfinijom predom ima najveću čvrstoću prema eksperimentalnim i teoretskim vrijednostima.

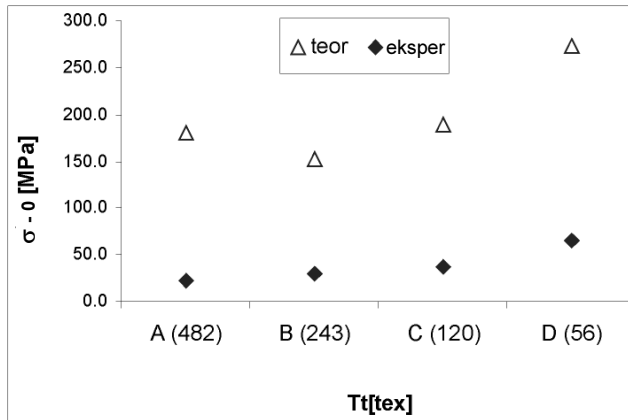
Tab.5 Čvrstoća staklene prede prema tehničkim specifikacijama proizvođača

Uzorak	A	B	C	D
Finoća staklene prede (tex)	272	136	68	34
Broj filamenata u pređi	1000	500	250	125
Prekidna sila (N)	160	74	50	25
Relativna čvrstoća prede (cN/tex)	59	54	74	74

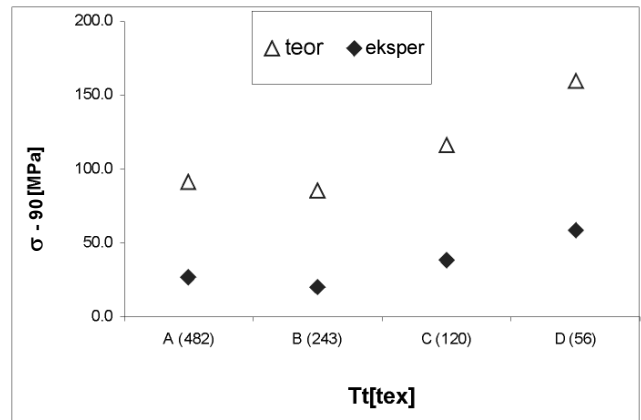


Sl.4 Premostivi elementi desno-desnog pletiva kod djelovanja sile: a) u smjeru nizova i b) u smjeru redova

Iz sl.6 se može uočiti da eksperimentalni i teoretski rezultati čvrstoće istezanja imaju istu tendenciju za sve ispitivane uzorke. Uzorak B ima najmanju, a D najveću vrijednost čvrstoće. Treba napomenuti da staklene prede različitih duljinskih masa nemaju jednaku relativnu čvrstoću, tab.5. Prede uzorka C i D imaju relativnu čvrstoću 74 cN/tex, znatno veću od uzorka A (59 cN/tex) i B (54 cN/tex). To je svakako i razlog zašto je kod kompozita C i D postignuta maksimalna čvrstoća istezanja (u oba smjera ispitivanja). Odstupanja eksperimentalnih i teoretskih vrijednosti čvrstoće i modula istezanja prikazana su na sl.7 i 8. Kao što se vidi na sl. 7 i 8, razlike između teoretskih i eksperimentalnih rezultata su manje u smjeru redova. Također se primjećuje da se



SI.5 Teoretske i eksperimentalne vrijednosti čvrstoće istezanja kompozita u smjeru nizova



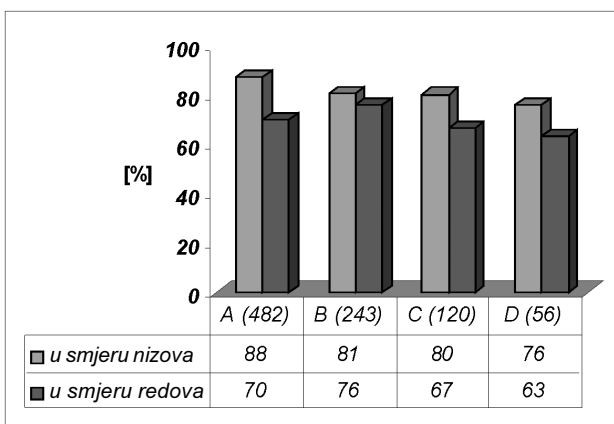
SI.6 Teoretske i eksperimentalne vrijednosti čvrstoće istezanja kompozita u smjeru redova

sa smanjenjem duljinske mase pređe smanjuje razlika između teoretskih i eksperimentalnih vrijednosti: kod uzoraka D i C zapažaju se najmanje razlike između teorijskih i eksperimentalnih vrednosti čvrstoće istezanja, očito zbog homogenije strukture u odnosu na uzorke A i B. Analogni zaključci nameću se i za modul istezanja, iako su kod modula razlike manje.

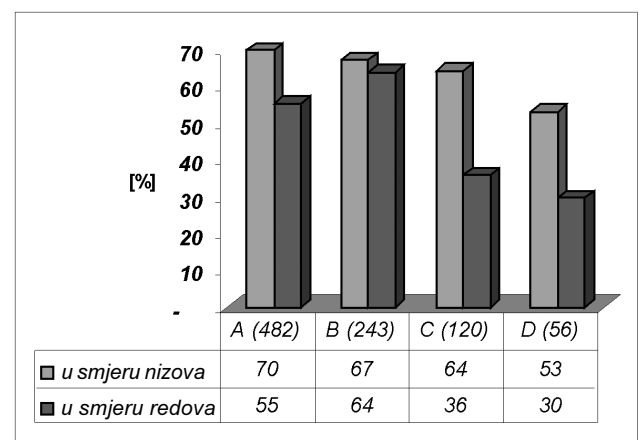
Kao što je navedeno, kompozit D od pletiva sa najfinijom pređom ima najbolja mehanička svojstva uz najmanju varijaciju rezultata, a i najmanja su odstupanja eksperimentalnih od teoretskih rezultata. Ove činjenice nedvojbeno ukazuju na utjecaj finoće pređe pletiva na mehanička svojstva kompozita. Upotrebom finije pređe dobivaju se manje površinske mase pletiva, a

veće gustoće. Pletiva veće gustoće osiguravaju ravnomjerniju raspoređenost ojačivača u kompozitu, što sa svoje strane poboljšava kvašenje zbog kraće putanje rastopljene matrice. Ovo doprinosi boljoj adheziji, a samim tim i boljim mehaničkim svojstvima. Budući da je debljina kompozita funkcija površinske mase pletiva, za postizanje jednake debljine kompozita mora se primijeniti veći broj slojeva pletiva finije pređe, čime se postiže efekt homogenizacije ojačivača i efekt dodatnog povezivanja slojeva u kompozitu. To svakako pozitivno utječe na mehanička svojstva [21]. Dodatno, pletiva od finijih pređa, manjeg promjera pređe, manje su orijentirana izvan ravnine što ide u prilog povećanju čvrstoće kompozita [22].

Uočene razlike između eksperimentalnih i teoretskih vrijednosti za  $\sigma$  i  $E$ , rezultat su nekoliko čimbenika. U prvom redu valja istaknuti da prilikom procesa pletenja nastaje izvjesno oštećenje staklenog vlakna, što utječe na mehanička svojstva kompozita. Istraživanja pokazuju da stupanj oštećenja staklene pređe (vlakna) u procesu pletenja može iznositi 20-90% [23]. Primijenjeni geometrijski model ima određene nedostatke u buduću da realna konfiguracija očica ima 3-D komponentu i da značajno odstupa u odnosu na idealnu konfiguraciju koja je uzeta u modelu. Ravnina kidanja kompozita nije idealna, odnosno mjesto prekida pređe ne mora nastati u stranicama i glavama očica. Prilikom pripreme pletenog predoblika, a naročito kod prešanja, dola-



SI.7 Odstupanja teoretskih od eksperimentalnih rezultata čvrstoće istezanja u smjeru nizova i redova



SI.8 Odstupanja teoretskih od eksperimentalnih rezultata modula istezanja u smjeru nizova i redova

zi do deformacije strukture pletiva, što također utječe na mehanička svojstva. U izrazu za izračun modula istezanja, volumni udio ojačivača i matrice predstavlja vrijednost za hibridnu pređu. Može se pretpostaviti da postoji izvjesno odstupanje vrijednosti odnosa volumena ovih komponenata u kompozitu. Model pretpostavlja idealnu adheziju između staklenog vlakna i polimerne matrice. Iako je u ovom radu upotrijebljeno stakleno vlakno s najboljom obradom [13], ipak može se pretpostaviti da postoje odstupanja od idealne adhezije.

Sve navedeno upućuje na zaključak o neophodnosti pronalaženja adekvatnijeg modela za opisivanje mehaničkih svojstava kompozita ojačanih kulirnim predoblicima. Isto tako, zbog specifične strukture kulirnih pletiva, neki autori [24] preporučuju određene modifikacije metoda ispitivanja za karakterizaciju kompozita od pletenih predoblika.

#### 4. Zaključak

Ispitivanja mehaničkih svojstava termoplastičnih kompozita od pletenih predoblika s različitom finoćom pređe pokazuju da upotreba finije pređa doprinosi dobivanju homogenijih svojstava kompozita s manjom varijacijom rezultata. Koefficijent varijacije rezultata čvrstoće i modula istezanja u smjeru nizova i redova kompozita s pređom finoće 56 tex iznosi od 2,2 do 5,5%, dok kod kompozita s pređom finoće 482 tex od 14,5% dostiže do 19,7%. Kompoziti imaju veće vrijednosti čvrstoće savijanja u odnosu na čvrstoću istezanja kao rezultat 3-D orijentacije pletene strukture ojačivača u kompozitu.

Postoji značajna razlika između teoretskih i eksperimentalnih rezultata modula i čvrstoće istezanja ispitivanih kompozita. Kod ispitivanja u smjeru redova dobiva se manja razlika između teoretskih i eksperimentalnih vrijednosti nego kod ispitivanja u smjeru nizova. Teoretski i eksperimentalni rezultati pokazu-

ju sličan trend promjene mehaničkih svojstava s promjenom finoće pređe. Odstupanja teoretskih od eksperimentalnih rezultata su najmanja kod kompozita s najfinijom pređom. Oštećenje staklene pređe u procesu pletenja, razlike između realne geometrije očice i pojednostavnjene geometrije modela, zanemarivanje 3-D konfiguracije pletiva i pretpostavljanje idealne adhezije između matrice i ojačavajućeg vlakana neki su od razloga za odstupanja teoretskih i eksperimentalnih rezultata.

Poboljšanje mehaničkih svojstava kompozita upotrebom pređe veće finoće rezultat je ravnomjernije raspoređenosti sustava matrica/ojačivač kod pletiva s većom finoćom pređa i poboljšanog kvašenja ojačivača rastopljenom matricom zbog kraćeg puta tečenja polimerne otopine do armirajućeg vlakna.

#### Literatura:

- [1] De Araujo M. et al: Modeling and Simulation of the Mechanical Behavior of Weft Knitted Fabrics for Technical Applications, *AUTEX Research Journal* **3** (2003) 3, 111-123
- [2] Power J.: Knitting Shells in the Third Dimension, *Journal of Textile and Apparel, Technology Management* **3** (2004) 4, 1-13
- [3] Cebula H. et al: Structure-Properties Relation of Biaxial Reinforced Multilayer Weft Knitted Structures for Reinforced Plastics, 1<sup>st</sup> International Textile Clothing & Design Conference, Dubrovnik, Croatia 6-9<sup>th</sup> October, 2002, 165-170
- [4] Savci S. et al: A Study of the Deformation of Weft-Knit Preforms for Advanced Composite Structures Part 1: Dry Preform Properties, *Composite Science and Technology* **60** (2000), 1931-1942
- [5] Shishoo R. et al: Industrial-Research Strategies for Technical Textiles at TEFO/IFP, *Journal of Textile Institute* **88** (1997) 3, 103-121
- [6] Gommers B. et al: Modeling the Elastic Properties of Knitted-Fabric-Reinforced Composites, *Composite Science and Technology* **56** (1996), 685-694

- [7] Cebulla H. et al: Fully Fashioned Biaxial Weft Knitted Fabrics, *AUTEX Research Journal* **2** (2002) 1, 1-13
- [8] Mader E., U. Bunzel: Influencing the Properties of Continuous Fibre-Reinforced Thermoplastics by Textile Processing, *International Textile Symposium, Frankfurt/Main, 1994*, 327
- [9] Demboski G., G. Bogoeva-Gaceva: Properties of Weft Knitted Composites Influenced by Preform Stretching, *Applied Composite Materials* **8** (2001) 371-384
- [10] Bini T.B. et al: Structure-Tensile Property Relationship of Knitted Fabric Composites, *Polymer Composites* **22** (2001) 1, 11-21
- [11] Bogoeva-Gaceva G., E. Mader: Consolidation and Mechanical Properties of FIT-Based Composites-Competition to Commingled Yarns, *Advancing with Composites 2000*, Milan May 9-11, 2000, 115-120
- [12] Karger-Kochis J., T. Czygany: Interfacial Effects on the Dynamic Mechanical Behavior of Weft Knitted Glass Fiber-Reinforced Polypropylene Composites Produced from Commingled Yarn, *Tensile and Flexural Response, Advanced Composite Materials* **4** (1997) 209-218
- [13] Demboski G., G. Bogoeva-Gaceva: Mehanička svojstva staklo/PET kompozita iz pletenih predoblika-utjecaj obrade vlakana, *Tekstil* **55** (2006.) 8, 383-395
- [14] Karger-Kochis J. et al: Effects of Interphase and Fibre Content on the Mechanical Behavior of Weft-Knitted Glass fibre Reinforced Polypropylene, *Advanced Composites Letters* **6** (1997) 2, 31-36
- [15] Bogdanovic A., C. Pastore: *Mechanics of Textile and Laminated Composites*, Chapman & Hall, London 1998, 150-155
- [16] Rudd C.D. et al: Mechanical Properties of Weft Knit Glass Fibre/Polyester Laminates, *Composite Science and Technology* **39** (1990.) 261-277
- [17] Ramakrishna S., D. Hull: *Tensile Properties of Knitted Carbon-Fibre-Fabric/Epoxy Laminates-Part II: Prediction of Tensile*

- Properties, Composite Science and Technology **50** (1994) 247-258
- [18] Ramakrishna S.: Analysis and Modeling of Plain Knitted Fabric Reinforced Composites, *Journal of Composite Materials* **31** (1997)1, 52-69
- [19] Ramakrishna S.: Characterization and Modeling of the Tensile Properties of Plain Weft-Knit Fabric Reinforced Composites, Composite Science and Technology **57** (1997) 1-22
- [20] Vetrotex technical information
- [21] Ramakrishna S., D. Hull: Tensile Properties of Knitted Carbon-Fibre-Fabric/Epoxy Laminates-Part I: Experimental, Composite Science and Technology **50** (1994.) 237-247
- [22] Gommers B. et al: Analysis of Knitted Fabric Reinforced Composites: Part II. Stiffness and Strength, Composite Part A, **29A** (1998) 1589-1601
- [23] Hu H., Z. Mei: A study of the Degree of Breakage of Glass Filament Yarns During the Weft Knit Process, *AUTEX Journal* **5** (2005) 3, 141-148
- [24] Karger-Kocsis J.: Towards Assessment of Reliable Mechanical Properties for Knitted Fabric-Reinforced Thermoplastic Composites, *Advanced Composites Letters* **7** (1998) 2, 39-43

## SUMMARY

### Mechanical Properties of Glass/PET Composites from Knitted Preforms - Influence of Yarn Count

The influence of yarn count on glass/PET weft knitted composites mechanical properties has been investigated. Theoretical model for estimating tensile strength and modulus of the composites has been applied. The theoretical and experimental values of tensile strength and modulus show similar trend with the change of preform yarn count. The sample of lowest yarn count shows the smallest difference between the theoretical and experimental values.

**Key words:** glass/PET composites, weft knitted preforms, mechanical properties, influence of yarn count

*St. Cyril and Methodius University, Faculty of Technology and Metallurgy  
Skopje, Republic of Macedonia*

*Received February 9, 2007*

### Mechanische Eigenschaften von Glas/PET-Verbundstoffen aus gestrickten Vorformen - Einfluss der Garnfeinheit

Der Einfluss der Garnfeinheit auf mechanische Eigenschaften von Glas/PET thermoplastischen Verbundstoffen aus kulierten gestrickten Vorformen wurde untersucht. Theoretische Modelle des Moduls und der Dehnungsfestigkeit für die untersuchten Verbundstoffe wurden verwendet. Mit steigender Garnfeinheit lässt sich eine niedrigere Variation der Verbundstoffeigenschaften erzielen. Theoretische und experimentelle Ergebnisse des Moduls und der Dehnungsfestigkeit der Verbundstoffe zeigen einen ähnlichen Veränderungstrend von mechanischen Eigenschaften mit Veränderung der Garnfeinheit. Die Differenz zwischen den theoretischen und experimentellen Ergebnissen ist bei Verbundstoffen aus dem feinsten Garn am kleinsten.