

Utjecaj anizotropije i finoće pređe na modul elastičnosti kulirnog desno-desnog pletiva

Prof.dr.sc. **Željko Penava**, dipl.ing.
Prof.dr.sc. **Diana Šimić Penava**, dipl.ing.¹
Prof.dr.sc. **Zlatko Vrljićak**, dipl.ing.
Sveučilišta u Zagrebu, Tekstilno-tehnološki fakultet
Zavod za projektiranje i menadžment tekstila
¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
Zagreb, Hrvatska
e-mail: zeljko.penava@ttf.hr
Prispjelo 3.1.2014.

UDK 677.075.017
Izvorni znanstveni rad

Pletiva su elastični ortotropni materijali. U ovom radu analizira se utjecaj anizotropije pletiva i finoće pređe na vrijednosti prekidne sile, istezanja pri prekidu i inicijalnih modula elastičnosti pletiva pri djelovanju vlačne sile na uzorke koji su izrezani pod različitim kutom u odnosu na smjer redova pletiva. Ispitane su četiri vrste glatkog kulirnog desno-desnog pletiva izrađenog s različitim finoćama pamučnih jednostrukih pređa. Za različite kutove rezanja uzorka eksperimentalno su određeni inicijalni moduli elastičnosti. Izračunata su odstupanja i ona pokazuju dobro podudaranje eksperimentalnih rezultata i računski dobivenih vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti, pa se navedene teorijske jednadžbe s visokom točnošću mogu koristiti za izračun inicijalnih modula elastičnosti pletiva za proizvoljno odabrane smjerove. Na osnovi istraživanja zaključeno je da se mjerenja trebaju provesti na uzorcima pletiva koji su izrezani u smjeru nizova, redova i pod kutom od 45°. Dokazano je da s porastom duljinske mase pređe rastu i vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti i prekidne sile, a istezanje pri prekidu se smanjuje.

Ključne riječi: kulirno desno-desno pletivo, finoća pređe, anizotropija, inicijalni modul elastičnosti, jednoosno istezanje, prekidna sila

1. Uvod

Mehanička svojstva tekstilnih plošnih tvorevina (pletiva i tkanina) pod djelovanjem vlačnog opterećenja počela su se proučavati 1937.godine [1, 2]. Kada se kut djelovanja vanjskog vlačnog opterećenja mijenja, mijenjaju se i elastične konstante (moduli elastičnosti i Poissonov koeficijent). Anizotropija je karakteristika pletiva i tkanina, koja utječe na njihova fizikalna i mehanička svojstva. Fizi-

kalna i mehanička svojstva pletiva određuju opseg njihovog krajnjeg korištenja u različitim potrebama i aplikacijama. Važno je poznavati parametre pletiva koji utječu na njihovo ponašanje tijekom upotrebe. Opterećenja koja djeluju na pletiva su relativno mala, a to znači da su ispod granice prekida. Trodimenzionalna deformacija obično se odvija u odjeći tijekom pokreta tijela i može uključivati ne samo istezanje u proiz-

voljnim smjerovima, nego i posmik, savijanje i tlak [3, 4]. Mjerenje istezanja pletiva kod djelovanja vlačne sile u različitim smjerovima je učinkovit način da se karakterizira anizotropija i strukturne promjene pletiva [5, 6]. Ujedno je jednoosno istezanje i najrašireniji postupak ispitivanja i analize fizikalnih i mehaničkih svojstava tekstilnih proizvoda [7, 8]. Na početku istezanja odnos između naprezanja i istezanja je proporcionalan.

S daljnjim produljenjem istezanje počinje brže rasti od naprezanja. Prema tome, odnos između naprezanja i istezanja više nije linearan [9-11]. Granica između područja gdje je odnos između naprezanja i istezanja linearan (elastično područje) i područja gdje je taj odnos nelinearan zove se granica popuštanja. Granica popuštanja je točka do koje je istezanje potpuno elastično i nakon rasterećenja iščezava.

Veličine naprezanja i deformacija tekstila pri promjeni kuta nagiba djelovanja vlačne sile su također jako važne [12, 13]. Mnogi istraživači polaze od klasične teorije elastičnosti s pretpostavkom da je pletivo anizotropni materijal s dvije ravnine simetrije. Čvrstoća i deformacija pletiva se teorijski proučavaju pomoću određenog geometrijskog modela [14, 15]. Postoji veza između Poissonova koeficijenta, modula smicanja i modula elastičnosti tekstila [16, 17].

Svrha ovoga rada je analizirati utjecaj finoće pređe i anizotropije pletiva na vrijednosti prekidnih sila, istezanja pri prekidu te na vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti. Usporedbom eksperimentalnih i računski dobivenih vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti treba dokazati primjenjivost teorijskih jednadžbi za računanje inicijalnih modula elastičnosti pletiva za proizvoljno odabrane smjerove djelovanja vlačne sile.

2. Teorijske osnove modula elastičnosti pletiva

Pletivo je tekstilni plošni proizvod sastavljen od očica. Pod pojmom pletiva razumijeva se tekstilni plošni proizvod sastavljen od redova i nizova očica. Očica je osnovna jedinica pletiva. Očice nastaju tako da se nit dovodi u valovit oblik, tj. kulira se, a zatim isprepliće s drugom niti pri čemu najprije nastaju poluočice, a zatim isprepletanjem sljedećih niti nastaju očice. Očice mogu biti desne (prave) i lijeve (krive). Kulirna pletiva su takva pletiva koja nastaju po-

prečnim dovođenjem pređe na igle, tj. pređa se dovodi vodoravno kao potka kod tkanja, i ovakva pređa se savija u valovit oblik, tj. kulira, te se iz ovako savijene pređe oblikuje red po red očica. Jedno od najznačajnijih svojstava pletiva za odjeću je njegova elastičnost, a time i rastezljivost u smjeru redova i nizova. Desno-desno kulirno pletivo je zbog svoje strukture nekoliko puta rastezljivije u smjeru redova nego u smjeru nizova.

Pletiva su elastični ortotropni materijali koji se u pogledu strukturnih karakteristika definiraju kao ortotropne ploče s dvije međusobno okomite ravnine elastične simetrije [18]. Te ravnine elastične simetrije su ravnine ortotropije, a njihovi presjeci su glavne osi. Os x je u smjeru redova, a os y je u smjeru nizova pletiva, sl.1.

2.1. Dijagram naprezanje-istezanje pletiva

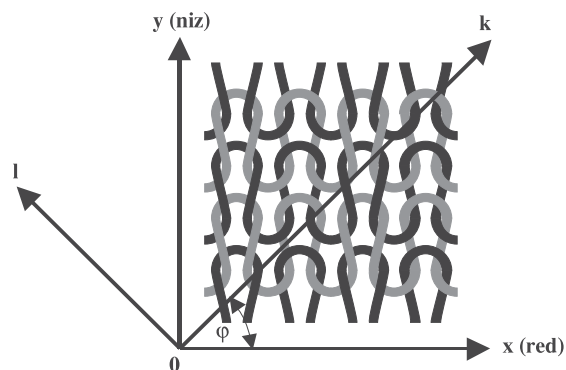
Funkcionalna veza između naprezanja i deformacija ne može se odrediti teorijski, već samo eksperimentalno ispitivanjem uzoraka izrađenih od određenog materijala. Mehaničke karakteristike uglavnom se istražuju unutar područja elastičnosti, znači u uvjetima niskih opterećenja [19, 20]. Tijekom djelovanja vlačne sile dolazi do pojave naprezanja u pletivu i njegovog istezanja (produljenja). Na sl.2. prikazana je krivulja odnosa naprezanja i istezanja pletiva.

Analizom dijagrama naprezanje-istezanje (sl.2) može se uočiti da se krivulja sastoji od tri glavna dijela [21]. Prvi dio (I) je linearni (pravocrtni)

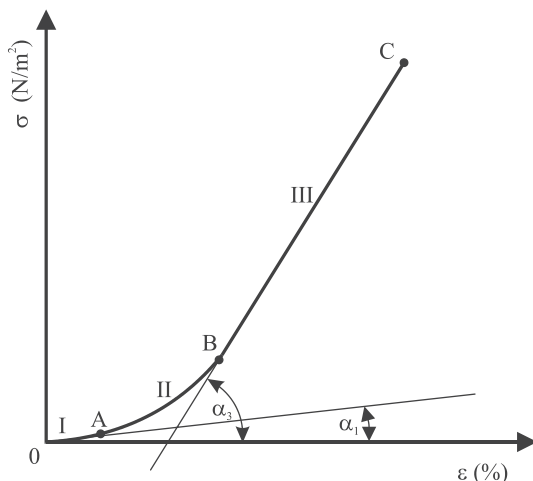
dio OA koji predstavlja elastični dio pletiva u kojem dolazi do pomicanja niti u pletivu. Drugi dio (II) je nelinearan i nalazi se na krivulji između točaka A i B . U dijelu AB , uz pomicanje niti u pletivu dolazi i do rasterećenja niti u njenom elastičnom području. Treći dio (III) je linearan i nalazi se na krivulji između točaka B i C . Nakon točke B , uz dalji porast sile, pređa se počinje deformirati i pletivo poprima trajne deformacije. Točka C predstavlja točku prekida. Prvi, linearni dio krivulje do točke A ima mali kut nagiba. Kod rastezljivosti pletiva u smjeru redova kut nagiba je mali. Međutim, treći linearni dio dijagrama, koji počinje od točke B , ima puno veći kut nagiba s obzirom na apscisu.

Pretpostavlja se da je krivulja opterećenje (naprezanje)-istezanje pletiva pravac ili približno pravac prije granice popuštanja, točka A . Naprezanje u različitim smjerovima djelovanja vlačne sile je približno u linearnom odnosu s deformacijom do granice popuštanja. Dakle, može se za to područje primijeniti Hookeov zakon za anizotropno ponašanje materijala kada vlačna sila djeluje u proizvoljnom smjeru, tj. kad se osi k, l ne podudaraju s glavnim osima x, y [22], (1):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_k \\ \varepsilon_l \\ \gamma_{kl} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_k} & -\frac{\nu_{lk}}{E_k} & \alpha_k \\ -\frac{\nu_{kl}}{E_l} & \frac{1}{E_l} & \alpha_l \\ \alpha_k & \alpha_l & \frac{1}{G_{kl}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_k \\ \sigma_l \\ \tau_{kl} \end{Bmatrix} \quad (1)$$



Sl.1 Shematski prikaz pletiva - element ortotropne ploče



Sl.2 Opća krivulja naprezanja σ i istežanja pletiva ε

σ_k i σ_l su normalna naprežanja, τ_{kl} je posmično naprežanje, $\varepsilon_k, \varepsilon_l$ su relativne normalne deformacije, γ_{kl} je relativna posmična deformacija, E_k, E_l su moduli elastičnosti, G_{kl} je modul posmika, α_k, α_l su elastični koeficijenti, ν_{kl}, ν_{lk} su Poissonovi koeficijenti za proizvoljni koordinatni sustav k, l .

2.2. Moduli elastičnosti pletiva u različitim smjerovima

Moduli elastičnosti E_k, E_l za proizvoljni smjer djelovanja vlačne sile, tj. u koordinatnom sustavu k, l čije se osi ne poklapaju s glavnim osima x, y (redovi i nizovi pletiva) dobiju se pomoću izraza za transformaciju elastičnih konstanti, koji su prikazani u jednadžbama (2) i (3) [23]:

$$\frac{1}{E_k} = \frac{\cos^4 \varphi}{E_x} + \frac{\sin^4 \varphi}{E_y} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2 \cdot \nu_{xy}}{E_y} \right) \cdot \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \varphi \quad (2)$$

$$\frac{1}{E_l} = \frac{\sin^4 \varphi}{E_x} + \frac{\cos^4 \varphi}{E_y} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2 \cdot \nu_{xy}}{E_y} \right) \cdot \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \varphi \quad (3)$$

gdje je φ kut između glavne osi x i smjera djelovanja vlačne sile, (sl.1); E_x, E_y su moduli elastičnosti u dva glavna smjera (smjer redova $\varphi=0^\circ$, smjer nizova $\varphi=90^\circ$); G_{xy} je modul posmika; ν_{xy} je Poissonov koeficijent pri istežanju pletiva u smjeru nizova. Zbog vrijednosti trigonometrijskih

funkcija na komplementarnim kutovima će biti $E_k=E_l$. Zato će se u daljnjim razmatranjima promatrati samo modul elastičnosti E_k označen sa E_φ . Modul elastičnosti E_φ u svakom smjeru istežanja se izračunava pomoću slijedeće jednadžbe (4):

$$\frac{1}{E_\varphi} = \frac{1}{E_k} = \frac{\cos^4 \varphi}{E_x} + \frac{\sin^4 \varphi}{E_y} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2 \cdot \nu_{xy}}{E_y} \right) \cdot \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \varphi \quad (4)$$

Brojčane vrijednosti E_x, E_y, G_{xy} i ν_{xy} dobiju se eksperimentalnim ispitivanjem uzoraka pletiva u laboratoriju. Međutim, u standardnim uvjetima vrijednosti G_{xy} i ν_{xy} se jako teško mogu odrediti eksperimentalnim mjerenjima. Zato se modul posmika G_{xy} i Poissonov koeficijent ν_{xy} zamjenjuju s modulima elastičnosti E_{45°, E_x i E_y čije vrijednosti je jednostavnije mjeriti u laboratoriju pri jednoosnom istežanju pletiva kada vlačne sile djeluju u smjerovima $\varphi=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$. Djelovanjem vlačne sile pod kutem $\varphi=45^\circ$ primjenom jednadžbe (4) dobiva se izraz (5) za E_{45° :

$$\frac{4}{E_{45^\circ}} = \frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2 \cdot \nu_{xy}}{E_y} \right) \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2 \cdot \nu_{xy}}{E_y} \right) = \frac{4}{E_{45^\circ}} - \frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_y} \quad (5)$$

Uvrštavanjem izraza (5) u jednadžbu (4) dobiva se izraz (6):

$$\frac{1}{E_\varphi} = \frac{\cos^4 \varphi}{E_x} + \frac{\sin^4 \varphi}{E_y} + \left(\frac{4}{E_{45^\circ}} - \frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_y} \right) \cdot \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \varphi \quad (6)$$

Jednadžba (6) daje matematičku vezu između modula elastičnosti za bilo koji smjer djelovanja vlačne sile i E_x, E_y i E_{45° .

3. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu rada izvedeni su pokusi na rastezanje uzoraka glatkog kulirnog desno-desnog pletiva pri statičkom opterećenju. Pri tom ispitivanju određene su veličine vlačnih sila i pripadna istežanja, te su dobiveni podaci o prekidnim silama i istežanjima pri prekidu [24]. U tu svrhu primijenjene su klasične metode i instrumenti za ispitivanje vlačnih svojstava pletiva. Pri tome treba paziti da mjerni sustav nema utjecaja na ispitni uzorak [25]. Pomoću rezultata mjerenja izračunati su inicijalni moduli elastičnosti ovisno o smjeru djelovanja vlačne sile na pletivo. Eksperiment je proveden mjerenjem deformacije pletiva kod djelovanja vlačne sile do prekida i to: u smjeru redova ($\varphi=0^\circ$), u smjeru nizova ($\varphi=90^\circ$), te pod kutovima $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ u odnosu na redove pletiva.

Provedenim eksperimentom želi se odrediti utjecaj finoće pređe i smjera djelovanja vlačne sile na vrijednosti prekidne sile, istežanja pri prekidu i na vrijednosti inicijalnog modula elastičnosti pletiva, te dokazati točnost izračuna inicijalnog modula elastičnosti pomoću teorijskih jednadžbi.

3.1. Uzorci pletiva i metoda za ispitivanje

Za izradu uzoraka pletiva korišten je kružnopletači dvoiglenični stroj finoće E 17 koji je pleo s 8 pletačih sustava smještenih na promjeru iglenica 200 mm (8 e⁴), pri radnoj brzini cilindra od 60 min⁻¹ s brojem igala od 432x2. Prema preporuci

proizvođača stroja koji ima finoću E17 poželjno je koristiti pamučne jednostruke pređe finoće 12 do 36 tex. Za ova istraživanja prihvaćena je optimalna dubina kuliranja prikladna za finoću pređe 20 tex. Pri izabranoj dubini kuliranja moglo se pletiti pređama finoće 16, 20, 25 i 30 tex. U zonu pletenja pređe su se dovodile istim vlačnim silama koje su iznosile 3 ± 1 cN. Mjerena je sila povlačenja pletiva koja je kod pletenja s pređom finoće 16 tex prosječno iznosila 14 cN/igli, a pri pletenju s pređom finoće 30 tex iznosila je 23 cN/igli.

Za ovo istraživanje korištene su jednostruke pamučne pređe nazivne finoće 16, 20, 25 i 30 tex, a njihovi uzorci pletiva označeni su oznakama U16, U20, U25 i U30, tab.1.

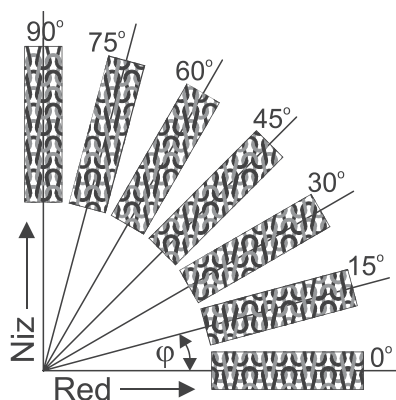
S navedenim pređama izrađeno je po deset metara pojedinog uzorka pletiva. Već se pri izradi pletiva uočava utjecaj finoće pređe na različite parametre strukture pletiva. S finijim pređama dobije se uže, lagnije i poroznije pletivo, a s grubljim pređama šire, masivnije i punije pletivo. Osnovni parametri analiziranih pletiva prikazani su u tab.1.

Zbijenost očica u redu i nizu pletiva određeni su na 1 cm duljine. Mjerna metoda i postupak po kojima se ispitala debljina pletiva definirana je normom HRN ISO 5084:2003. Za određivanje broja nizova i redova očica na jedinicu duljine korištena je norma DIN EN 14971.

Prije samog ispitivanja svi uzorci su kondicionirani u uvjetima standardne atmosfere (relativna vlažnost zraka 65 ± 4 %, temperatura 20 ± 2 °C). Za ispitivanje vlačne čvrstoće uzoraka, izrezani su standardni uzorci dimenzija 200 x 50 mm, ukliješteni u ste-

zaljke uređaja na razmaku od 100 mm, te izloženi jednoosnom vlačnom opterećenju do postizanja prekida pri brzini povlačenja od 100 mm/min, uz predopterećenje za uzorke U16 i U20 od 2 N, a za uzorke U25 i U30 od 5 N.

Uzorci su izrezani u sedam različitih smjerova (sl.3): u smjeru redova ($\varphi=0^\circ$), smjeru nizova ($\varphi=90^\circ$), te pod kutovima 15° , 30° , 45° , 60° , 75° prema redovima pletiva. Smjer djelovanja vlačne sile tijekom izvođenja pokusa je uvijek jednak. Za svaki navedeni smjer rezanja uzorka pletiva, provedeno je pet mjerenja. Vlačna svojstva svih uzoraka ispitivana su prema HRN EN ISO 13934-1:2013 metodom ispitne trake na uređaju za mjerenje čvrstoće pletiva, tj. na dinamometru.



Sl.3 Shematski prikaz smjerova (kutova) izrezivanja uzoraka

Za ispitivanje je korišten dinamometar Statimat M njemačke tvrtke Textechno. Navedeni dinamometar Statimat M je potpuno automatiziran, mikroprocesorski upravljani, statički dinamometar koji radi na načelu konstantne brzine deformacije.

3.2. Prikaz rezultata mjerenja

Pri djelovanju vlačne sile F mjeri se odgovarajuća uzdužna deformacija, tj. istežanje ε . Srednje vrijednosti rezultata mjerenja djelovanja vlačne sile F i pripadnog istežanja ε za uzorke koji su izrezani pod kutovima 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° i 90° u odnosu na smjer redova prikazane su na F- ε dijagramima, sl.4-7.

Pripadajuće srednje vrijednosti prekidne sile F_φ (N) i istežanja pri prekidu ε_φ (%) prikazane su u tab.2 za sve smjerove rezanja uzoraka pletiva U16, U20, U25, U30.

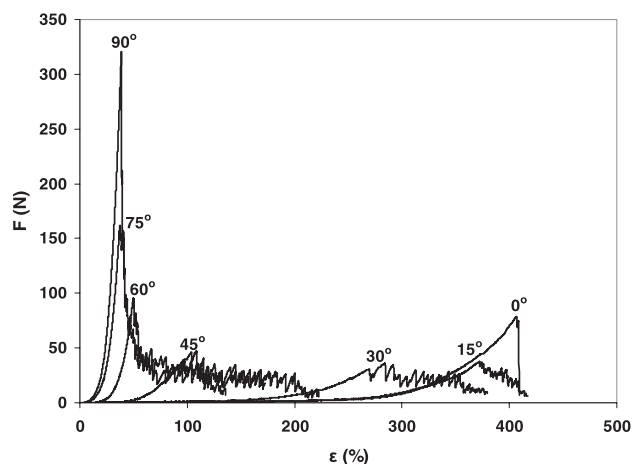
Ovisnost veličine prekidne sile F_φ o finoći, odnosno duljinskoj masi pređe i kutu rezanja uzoraka s obzirom na smjer redova za sve vrste ispitanih uzoraka pletiva prikazana je na sl.8. Neovisno o smjeru rezanja uzorka, vrijednost prekidne sile raste s porastom duljinske mase pređe. Prekidna sila pletiva ima najveću vrijednost kada su uzorci rezani u smjeru nizova ($\varphi=90^\circ$). Sa smanjenjem kuta φ , vrijednosti prekidne sile se smanjuju, najmanju vrijednost poprima kada su uzorci rezani pod kutom $\varphi=30^\circ$ u odnosu na smjer redova. Pri daljnjem smanjenju kuta prema smjeru redova ($\varphi=0^\circ$), vrijednosti prekidne sile blago se povećavaju.

Ovisnost veličine istežanja pri prekidu ε_φ o finoći pređe i kutu rezanja uzoraka s obzirom na smjer redova za sve vrste ispitanih uzoraka pletiva prikazana je na sl. 9. Istežanje pri prekidu u ovisnosti o duljinskoj masi pređe pokazuje suprotnu pravilnost od prekidne sile. S porastom duljinske mase pređe, vrijednosti istežanja pri prekidu blago rastu kada su uzorci izrezani u smjeru nizova ($\varphi=90^\circ$) do kuta 45° . Kada se smjer rezanja uzorka mijenja od kuta 45° do smjera redova ($\varphi=0^\circ$), s porastom duljinske mase pređe, vrijednosti istežanja pri prekidu se smanjuju.

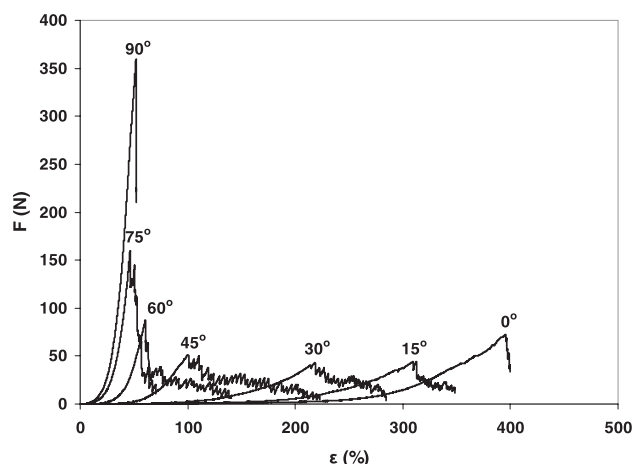
Vrijednosti istežanja pri prekidu blago se povećavaju kada su uzorci izrezani u smjeru nizova ($\varphi=90^\circ$) do kuta 60° , a nakon tog kuta vrijednosti istežanja pri prekidu povećavaju se

Tab.1 Osnovni parametri strukture pletiva

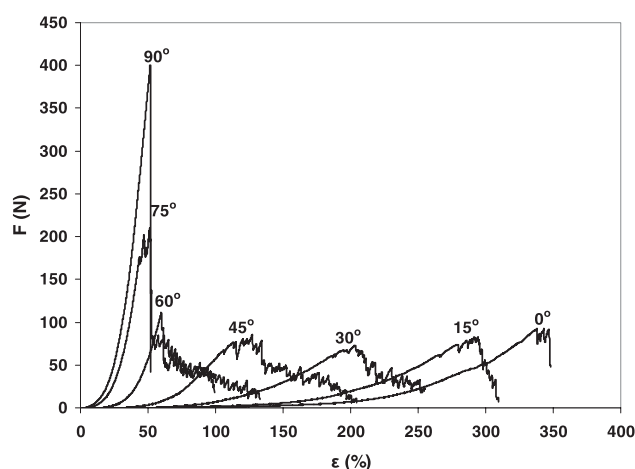
Parametar strukture pletiva	Oznake uzoraka pletiva			
	U16	U20	U25	U30
Zbijenost očica u redu, D_h (oč./cm)	11,8	10,9	10,1	10,1
Zbijenost očica u nizu, D_v (oč./cm)	11,0	12,0	12,8	13,2
Utrošak niti u očici, ℓ (mm)	3,22	3,20	3,20	3,21
Debljina, d (mm)	0,62	0,71	0,82	0,88
Površinska masa, m (g/m ²)	131	168	211	246



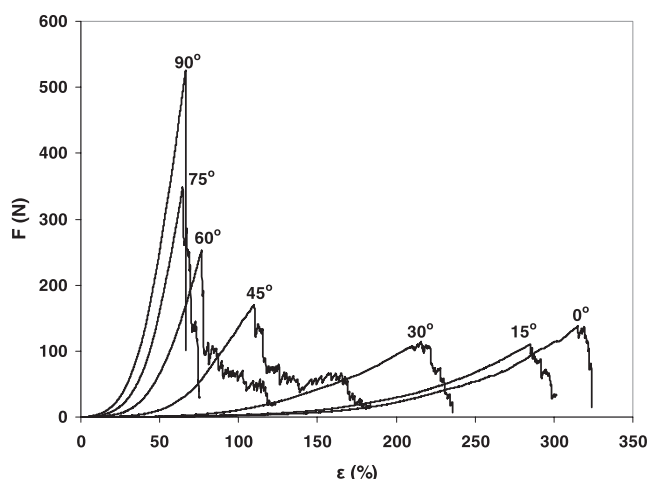
Sl.4 Dijagram sila-istezanje (F-ε) za uzorak pletiva U16



Sl.5 Dijagram sila-istezanje (F-ε) za uzorak pletiva U20



Sl.6 Dijagram sila-istezanje (F-ε) za uzorak pletiva U25



Sl.7 Dijagram sila-istezanje (F-ε) za uzorak pletiva U30

znatno brže do uzoraka rezanih u smjeru redova ($\varphi=0^\circ$). Najveće prekidno istezanje je kada su uzorci izrezani u smjeru redova očica, a najveća prekidna sila se pojavljuje kada su uzorci izrezani u smjeru nizova očica.

Na sl.10 i 11 prikazane su fotografije početnog stanja uzorka i stanja ispitnog uzorka U30 za silu u točki A (sl.2) uz povećanje 55x kada je uzo-

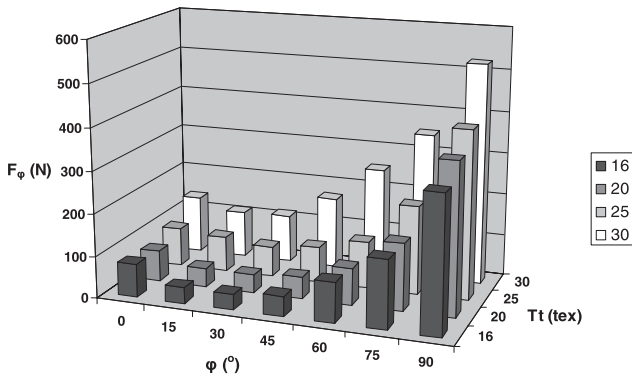
rak izrezan u smjeru redova ($\varphi=0^\circ$), pod kutom od 45° i u smjeru nizova ($\varphi=90^\circ$). Fotografije na sl.11 pokazuju da je deformacija istezanja uzorka U30 u smjeru nizova ($\varphi=90^\circ$) uz navedenu os djelovanja sile (označeno strelicom) prilično jednolika, a deformacija istezanja u smjeru redova ($\varphi=0^\circ$) i pod kutom od 45° je nepravilna, što ukazuje na pojavu složene unutarnje napetosti između pređa.

3.3. Eksperimentalne vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti

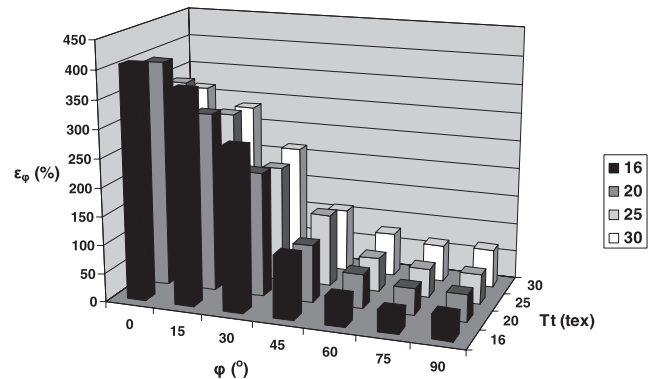
Iz prikazanih dijagrama, na slikama 4-7, koriste se vrijednosti vlačne sile u elastičnom linearnom području. Inicijalni modul elastičnosti E_φ je određen iz prvog linearnog područja na krivulji naprezanje-istezanje ($\sigma-\epsilon$) koje se određuje praćenjem eksperimentalnih podataka pomoću regresijske kontrolne karte, odnosno

Tab.2 Srednje vrijednosti istezanja pri prekidu i prekidne vlačne sile

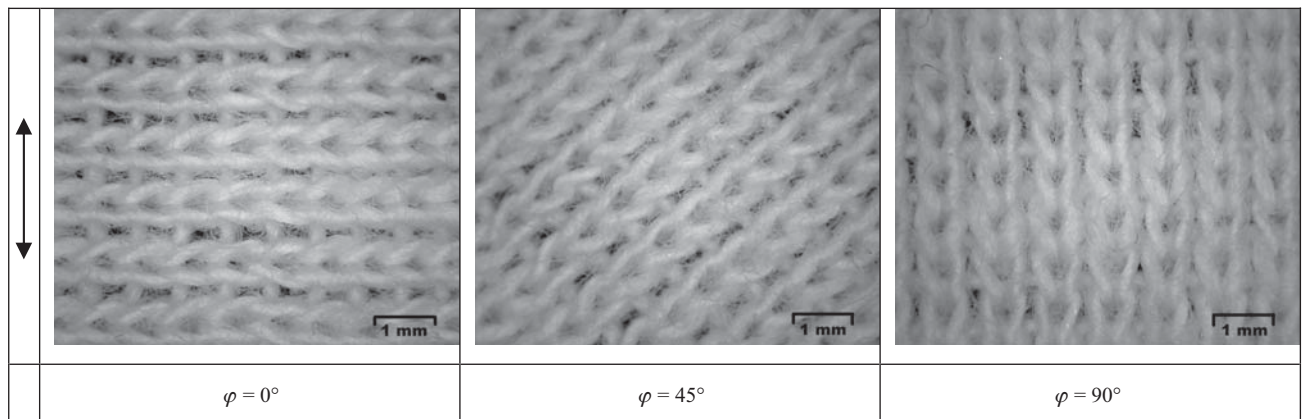
Kut rezanja φ (°)	U16		U20		U25		U30	
	ϵ_φ (%)	F_φ (N)	ϵ_φ (%)	F_φ (N)	ϵ_φ (%)	F_φ (N)	ϵ_φ (%)	F_φ (N)
0	406,53	78,90	395,53	72,79	343,08	92,41	314,99	137,74
15	371,89	37,52	312,63	44,19	291,91	83,13	285,11	111,08
30	284,11	36,30	218,27	43,01	203,19	72,88	215,67	114,26
45	109,04	47,28	100,60	51,43	127,28	85,37	109,84	169,88
60	49,72	95,62	60,48	87,16	59,76	111,29	76,68	253,58
75	37,44	161,70	46,32	159,95	51,20	210,53	64,56	348,88
90	42,16	321,03	47,96	359,69	51,64	400,72	66,40	524,90



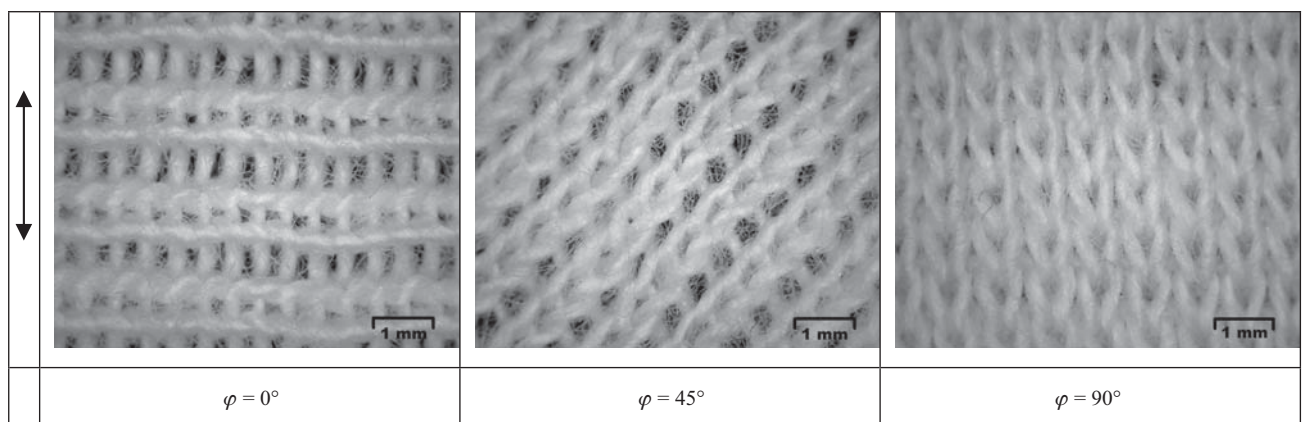
Sl.8 Ovisnost veličine prekidne sile F_φ o finoći pređe i smjeru rezanja uzorka



Sl.9 Ovisnost veličine istežanja pri prekidu ϵ_φ o finoći pređe i smjeru rezanja uzorka



Sl.10 Početno stanje uzorka U30 uz povećanje 55x izrežanog pod kutovima 0°, 45°, 90°



Sl.11 Stanje uzorka U30 kod sile koja djeluje u točki A uz povećanje 55x izrežanog pod kutovima 0°, 45°, 90°

pravca regresije [26]. U tom području je linearan odnos sile, odnosno naprežanja i istežanja.

Inicijalni modul elastičnosti E_φ se definira kao nagib krivulje naprežanje-istežanje u linearnom području

elastičnih deformacija gdje vrijedi Hookeov zakon za jednoosno stanje naprežanja (7):

$$E = \tan \alpha = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F}{\epsilon \cdot b \cdot d} [Pa] \quad (7)$$

gdje je b širina (mm), a d debljina pletiva (mm).

Koristeći vrijednosti F i ϵ u elastičnom području i izraz (7) računaju se srednje vrijednosti inicijalnih modula

Tab.3 Eksperimentalno dobivene vrijednosti modula elastičnosti E_φ (kPa)

Oznaka pletiva	E_{0°	E_{15°	E_{30°	E_{45°	E_{60°	E_{75°	E_{90°
U16	0,30	0,32	0,43	0,67	1,60	4,38	8,33
U20	0,38	0,47	0,58	1,02	2,69	6,34	9,29
U25	0,71	0,74	0,90	1,54	3,27	7,69	10,84
U30	0,93	1,06	1,21	2,22	3,99	8,53	11,53

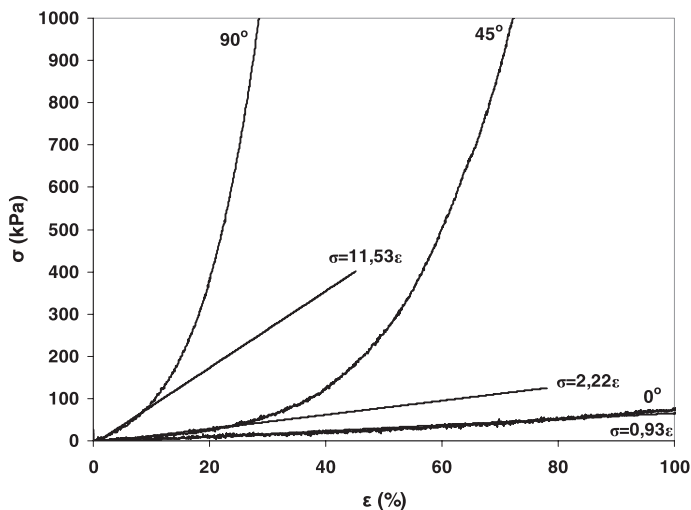
elastičnosti E_φ u odnosu na proizvoljni smjer rezanja uzorka pletiva. Za uzorke pletiva U30 na krivulje naprezanje-istezanje (σ - ϵ) u elastičnom području, tj. u linearnom dijelu se postave linearne regresijske jednadžbe i pripadni koeficijenti regresije pri rezanju uzoraka u smjerovima 0° , 45° i 90° , sl.12. Nagib krivulje, odnosno koeficijent smjera pravca predstavlja modul elastičnosti E_φ . Dobivene eksperimentalne vrijednosti inicijalnog modula elastičnosti E_φ za kutove 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° i 90° su prikazane u tab.3.

Dijagram ovisnosti eksperimentalno dobivenih vrijednosti inicijalnog modula elastičnosti E_φ o finoći pređe i kutu rezanja uzorka pletiva u odnosu na smjer redova prikazan je na sl.13.

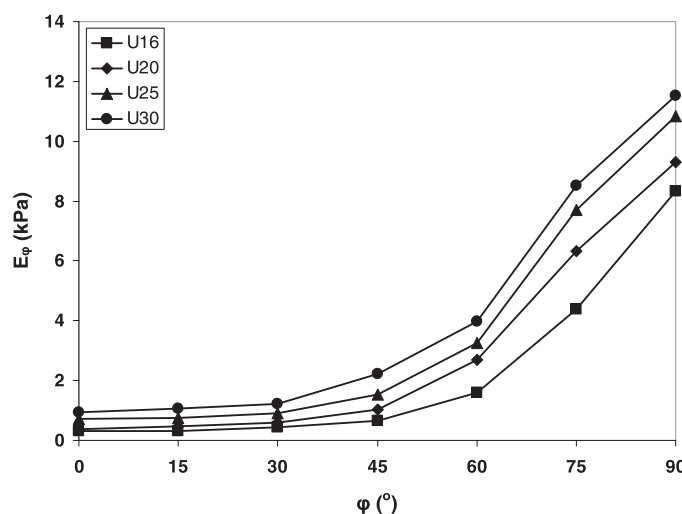
S porastom duljinske mase pređe rastu i vrijednosti inicijalnog modula elastičnosti E_φ za bilo koji smjer rezanja uzorka. Neovisno o finoći pređe, vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti se povećavaju s porastom kuta φ rezanja uzorka u odnosu na smjer redova. Najmanje vrijednosti inicijalnog modula elastičnosti dobivene su kod uzoraka izrezanih u smjeru redova ($\varphi=0^\circ$), zatim dolazi do blagog povećanja kod uzoraka rezanih pod kutom 45° , a nakon toga se vrijednosti modula elastičnosti naglo povećavaju do najveće vrijednosti kod uzoraka pletiva izrezani u smjeru nizova ($\varphi=90^\circ$).

4. Računske vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti i usporedba rezultata

Na osnovi eksperimentalnih vrijednosti E_{0° , E_{90° i E_{45° iz tab.3 i pomoću izraza (6) izračunate su vrijednosti modula elastičnosti E_φ u ovisnosti o promjeni kuta rezanja uzorka pletiva. U tab.4 su prikazane računski dobivene vrijednosti modula elastičnosti za različite kutove rezanja uzorka pletiva (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° i 90°).



Sl.12 Dijagram naprezanje-istezanje (σ - ϵ) i pravci regresije za pletivo U30



Sl.13 Eksperimentalne vrijednosti inicijalnog modula elastičnosti E_φ za uzorke pletiva izrezanih pod kutovima od 0° do 90° (uz skalu od 15°)

Dijagram računskih vrijednosti modula elastičnosti E_φ (kPa) uzorka pletiva od 0° do 90° za svakih 5° prikazan je na sl.14.

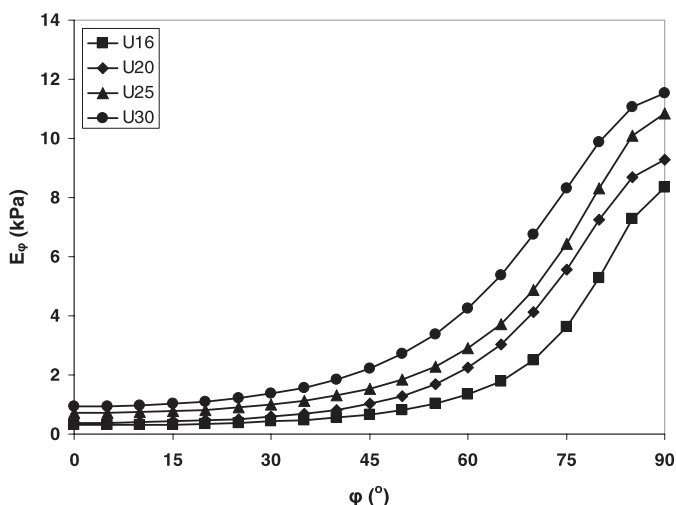
U tab. 5 prikazana su odstupanja D u postocima između eksperimentalnih vrijednosti (tab.3) i računskih vrijednosti (tab.4) inicijalnih modula elastičnosti E_φ . Odstupanja D (%) su izračunata prema izrazu (8):

$$D = \frac{E_{\varphi,eks} - E_{\varphi,rac}}{E_{\varphi,eks}} \cdot 100(\%) \quad (8)$$

Kod uzoraka izrezanih u smjeru redova ($\varphi=0^\circ$), u smjeru nizova ($\varphi=90^\circ$) i pod kutom 45° , razlike u postocima između eksperimentalnih i računskih vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti E_φ su 0 %. To slijedi iz jednadžbe (6) zbog perio-

Tab.4 Računske vrijednosti modula elastičnosti E_φ (kPa)

Oznaka pletiva	E_{0°	E_{15°	E_{30°	E_{45°	E_{60°	E_{75°	E_{90°
U16	0,30	0,33	0,42	0,67	1,34	3,61	8,33
U20	0,38	0,42	0,59	1,02	2,24	5,57	9,29
U25	0,71	0,77	1,00	1,54	2,89	6,44	10,84
U30	0,93	1,02	1,37	2,22	4,24	8,32	11,53



Sl.14 Računske vrijednosti inicijalnog modula elastičnosti E_{φ} za svakih 5°

Tab.5 Odstupanja D u (%) između eksperimentalnih i računskih vrijednosti E_{φ}

Oznaka pletiva	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
U16	0	-2,14	1,50	0	16,42	17,51	0
U20	0	10,04	-0,90	0	16,78	12,08	0
U25	0	-4,35	-10,55	0	11,52	16,21	0
U30	0	3,38	-13,12	0	-6,42	2,55	0

Tab.6 Jednadžbe regresije i koeficijenti korelacije (r) za $E(\varphi)$

Oznaka pletiva	Jednadžba regresije $E(\varphi)$	r
U16	$3 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi^3 - 0,0027 \cdot \varphi^2 + 0,0602 \cdot \varphi + 0,085$	0,9922
U20	$2 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi^3 - 0,0008 \cdot \varphi^2 + 0,0082 \cdot \varphi + 0,410$	0,9917
U25	$3 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi^3 - 0,0011 \cdot \varphi^2 + 0,0182 \cdot \varphi + 0,697$	0,9935
U30	$8 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi^3 - 0,0011 \cdot \varphi^2 + 0,0377 \cdot \varphi + 1,154$	0,9913

dičnosti *sin* i *cos* funkcija za te vrijednosti. Negativne vrijednosti odstupanja pokazuju da su dobivene računске vrijednosti E_{φ} veće od eksperimentalnih vrijednosti E_{φ} . Navedene teorijske jednadžbe (6) s visokom točnosti mogu koristiti za izračun modula elastičnosti pletiva.

U tab.6 prikazane su jednadžbe regresije i koeficijente korelacije za četiri uzorka pletiva. Jednadžbe regresije su polinomi trećeg reda koji jako dobro opisuju krivulju računskih vrijednosti modula elastičnosti i koriste se za računanje modula elastičnosti E_{φ} u ovisnosti o promjeni smjera rezanja uzoraka.

5. Zaključak

Pletiva se mogu definirati kao ortotropni materijali za koje se u linear-

nom elastičnom području krivulje naprežanja-istezanja može primijeniti Hookeov zakon za anizotropno ponašanje materijala pri proračunu modula elastičnosti kada su uzorci pletiva rezani u proizvoljnom smjeru. S porastom duljinske mase pređe, rastu vrijednosti prekidne sile i inicijalnih modula elastičnosti E_{φ} , a istezanje pri prekidu se smanjuje do $\varphi = 45^{\circ}$. Inicijalni moduli elastičnosti se povećavaju s porastom kuta rezanja uzorka u odnosu na smjer redova. Najveći modul elastičnosti je kada su uzorci izrezani u smjeru nizova ($\varphi=90^{\circ}$), a najmanja vrijednost modula elastičnosti je kada su uzorci izrezani u smjeru redova ($\varphi=0^{\circ}$). Vrijednosti prekidne sile su najveće za izrezane uzorke u smjeru nizova pletiva, a prekidnog istezanja za smjer redova pletiva.

Eksperimentalni rezultati pokazuju primjenjivost teorijskih jednadžbi za računanje modula elastičnosti pletiva za proizvoljno odabrane smjerove rezanja uzorka pletiva. Mjerenja se moraju provesti samo kada vlačna sila djeluje na uzorke pletiva koji su rezani u smjeru nizova, redova i pod kutom od 45° . Jednadžbe regresije su polinomi trećeg stupnja čiji koeficijenti korelacije potvrđuju vrlo visoku povezanost između kuta djelovanja sile i modula elastičnosti.

Literatura:

- [1] Kovar R., B.S. Gupta: Study of the Anisotropic Nature of the Rupture Properties of a Plain Woven Fabric, *Textile Research Journal* 79 (2009.) 6, 506-516
- [2] Peirce F.T.: The geometry of cloth structure, *Journal of the Textile Institute* 28 (1937.) T45-T96
- [3] Leaf G.A.V.: Analytical Plain Weave Fabric Mechanics and the Estimation of Initial Shear Modulus, *Journal of the Textile Institute* 92 (2001) 3, pp70-79
- [4] Bao L. et al.: Determining the Apparent Shear Rigidity of Textile Fabrics by Uniaxial Tensile Test, *Sen'i Gakkaishi* 53 (1997.) 4, 139-145
- [5] Pan N., M-Y. Yoon: Structural Anisotropy, Failure Criterion, and Shear Strength of Woven Fabrics, *Textile Research Journal* 66 (1996.) 4, 238-244
- [6] Thirwell B.E., L.R.G. Treloar: Non-Woven Fabrics. Part VI: Dimensional and Mechanical Anisotropy, *Textile Research Journal* 35 (1965) 9, pp827-835
- [7] Bassett R.J. et al.: Experiment Methods for Measuring Fabric Mechanical Properties: a Review and Analysis, *Textile Research Journal* 69 (1999.) 11, 866-875
- [8] Leaf G.A., A. Glaskin: The geometry of plain knitted loop. *Journal of the Textile Institute* (1955) 25, 587
- [9] Ramakrishna S.: Characterization and modelling of the tensile properties of plain weft-knitfabric-reinforced composites, *Composites Sci. Technol.* (1997) 57, 1-22

- [10] Zhangyu F.Z., C. Yanmo, L. Hairu: Effects of pre-stretching on the tensile properties of knitted glass fiber fabric reinforced polypropylene composite, *J. Thermoplastic Composite Mater.* (2006) 19, 399-411
- [11] Kawabata S.: Nonlinear mechanics of woven and knitted materials. In *Textile Structural Composites* (Chou, T. W. and Ko, F. K., eds). Elsevier, 1989
- [12] Shanahan W.J. et al.: Characterizing the Elastic Behavior of Textile Fabrics in Complex Deformations, *Textile Research Journal* 48 (1978.) 9, 495-505
- [13] Kilby W.F.: Planar Stress-strain Relationship in Woven Fabrics, *Journal of the Textile Institute* 54 (1963) T9-T27
- [14] Kawabata S. et al.: The Theoretical Investigation on the Biaxial Tensile Properties of Plain Knitted Fabrics, Part 1: Theory, *Sen'i Gakkaishi*, 23 (1970) T95-T108
- [15] Gommers B. et al.: Modelling the elastic properties of knitted fabric-reinforced composites, *Composite Science and Technology* 56 (1996) 685-694
- [16] Bao L. et al.: Error Evaluation in Measuring the Apparent Poisson's Ratios of Textile Fabrics by Uniaxial Tensile Test, *Sen'i Gakkaishi* 53 (1997) 1, 20-26
- [17] Lloyd D.W. et al.: An Examination of a "Widejaw" Test for the Determination of Fabric Poisson Ratio, *Journal of the Textile Institute* 68 (1977) 299-302
- [18] Lekhnitskii S.G.: *Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body*, Mir Publishers, Moscow, 1981
- [19] Zouari R. et al.: Experimental and numerical analyses of fabric off-axes tensile test, *The Journal of The Textile Institute* 101 (2010) 1, 58-68
- [20] Kelay M.S., D.L. Bader, P.E.. Reed: Mechanical deformation mechanisms in knitted fabric composites, *J. Thermoplastic Composite Mater.*, (1997) 10, 76-84
- [21] Vrljićak Z.: Utjecaj sile u niti na ulazu u pletači sistem na mehanička svojstva desno-desnog kulirnog pletiva, *Tekstil* 39 (1990.) 9, 544-549
- [22] Penava Ž., D. Šimić: Analysis of the elastic constants of woven fabrics for at random chosen extension directions, *Tekstil* 61 (2012.) 7-12, 169-179
- [23] Penava Ž., Šimić Penava D., Knezić Ž., Determination of the Elastic Constants of a Plain Woven Fabrics by Tensile Test in Various Directions, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 22 (2014) 57-63
- [24] Jinyun Z, L. Yi, J. Lam, C. Xuyong: The Poisson Ratio and Modulus of Elastic Knitted Fabrics, *Textile Research Journal* 80 (2010) 18, 1965-1969
- [25] Postle R. et al.: *The Mechanics of Wool Structures*, Ellis Horwood Limited Publishers, Chichester, UK, 1988., ISBN 0-7458-0322-9
- [26] Ozkul B, D. Karaoglan: Regression control chart for determination of Young's modulus: A case study. *Scientific Research and Essays*; 6 (2011) 30, 6393-6403

SUMMARY**Influence of anisotropy and yarn count on the modulus of elasticity of weft rib knitted fabric***Ž. Penava, D. Šimić Penava¹, Z. Vrljičak*

Knitted fabrics are elastic orthotropic materials. This paper analyzes the effect of anisotropy of knitted fabrics and yarn count on the value of breaking force, elongation at break and initial modulus of elasticity under the action of tensile forces on samples that were cut at different angles to the direction of knitting. Four types of weft rib knitted fabrics with different fineness of single cotton yarn were tested. For different angles of cutting samples, initial modulus of elasticity were determined experimentally in the laboratory. Deviations were calculated and they show good agreement between experimental results and the calculated values of initial modulus of elasticity, so the theoretical equations can be used with high accuracy to calculate the initial modulus of elasticity of knitted fabrics in various directions. Therefore, the measurements need to be implemented when the tensile force acting on the knitted fabric samples which are cut in the direction of courses, wales and at the angle of 45°. It has been proved that with the increase of the value of yarn count, the values of initial modulus of elasticity and breaking force increases, while simultaneously elongation at break decreases.

Key words: weft rib knitted fabric, yarn count, anisotropy, initial modulus of elasticity, uniaxial elongation, breaking force

University of Zagreb, Faculty of Textile Technology

¹University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering

Zagreb, Croatia

e-mail: zeljko.penava@ttf.hr

Received January 3, 2014

**Einfluss der Anisotropie und Garnfeinheit auf den Elastizitätsmodul
von Rechts-Rechtsmaschenware**

Maschenwaren sind elastische orthotrope Materialien. In dieser Arbeit werden die Auswirkungen der Anisotropie der Maschenware und der Garnfeinheit auf Reißkraft, Reißdehnung und Anfangselastizitätsmodul unter der Wirkung der Zugkräfte auf Proben, die unter verschiedenen Winkeln in die Strickrichtung geschnitten wurden, untersucht. Vier Typen der glatten Rechts-Rechtsmaschenware, die aus einfachen Baumwollgarnen mit unterschiedlichen Feinheiten gestrickt wurden, wurden geprüft. Anfangselastizitätsmodule für verschiedene Schnittwinkel von Proben wurden experimentell im Labor bestimmt. Abweichungen wurden berechnet und sie zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Versuchsergebnissen und den berechneten Werten des Anfangselastizitätsmoduls; deshalb können die theoretischen Gleichungen mit hoher Genauigkeit verwendet werden, um das Anfangselastizitätsmodul von Maschenwaren in verschiedenen Richtungen zu berechnen. Es ist aufgrund der Untersuchungen festgestellt worden, dass die Messungen der Gestrickproben, die in der Richtung von Maschenreihen und -stäbchen und unter dem Winkel von 45° geschnitten wurden, durchgeführt werden sollten. Es ist bewiesen worden, dass mit Garnfeinheitserhöhung die Werte von Anfangselastizitätsmodul und Bruchkraft zunehmen, während die Bruchdehnung gleichzeitig zurückgeht.