

Utjecaj pripreme slikarskog platna na modul elastičnosti i prekidna svojstva pri djelovanju vlačne sile

Prof.dr.sc. **Željko Penava**, dipl.ing.
Prof.dr.sc. **Diana Šimić Penava**, dipl.ing.¹
Marijana Tkalec, dipl.ing.
Tekstilno-tehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Zavod za projektiranje i menadžment tekstila
¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
Zagreb, Hrvatska
e-mail: zeljko.penava@ttf.hr
Prispjelo 3.10.2014.

UDK 677.074.017
Izvorni znanstveni rad

Slikarska platna su naslojene tkanine čija su mehanička svojstva značajno poboljšana u odnosu na temeljni nosivi tekstilni materijal. U radu će biti prikazano eksperimentalno ispitivanje i određivanje mehaničkih svojstava slikarskog platna. Ispitana su četiri uzorka koji su izrezani pod kutovima 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° i 90° u odnosu na smjer potke. Tkanine su mjerene prije premaza i nakon jednog, dva i tri premaza. Istraživane su vrijednosti prekidne sile, prekidnog istezanja, prekidnog suženja, rada do prekida, modula elastičnosti i stupnja anizotropije naslojenih tekstilnih plošnih materijala. Dokazano je da se s povećanjem broja nanesenih slojeva povećavaju vrijednosti prekidne sile, prekidnog istezanja, rada do prekida i moduli elastičnosti, a istodobno se smanjuju koeficijenti anizotropije. Naslojenom materijalu koji ima više nanesenih slojeva se smanjuju anizotropna svojstva, a povećavaju izotropna svojstva. U radu se uspoređuju eksperimentalne i teorijske vrijednosti modula elastičnosti, te se njihova razlika smanjuje s porastom broja slojeva.

Ključne riječi: anizotropija, prekidna sila, prekidno istezanje, modul elastičnosti, slikarsko platno

1. Uvod

Tekstilni materijali (tkanine, pletiva, netkani tekstil) općenito su nehomogeni, anizotropni i diskontinuirani objekti. Danas primjena tekstilnih materijala u različitim industrijskim granama sve više raste, posebno kao kompozitnih materijala, te je poznavanje njihovih fizikalno-mehaničkih svojstava vrlo važno. Da bi se tekstilnim materijalima značajno poboljšala

prvobitna mehanička svojstva, na temeljni nosivi tekstilni materijal se nanose jednostrano ili dvostrano u jednom ili više slojeva određeni premazi. Tako se dobije naslojeni tekstilni plošni proizvod koji ima značajno poboljšana svojstva u odnosu na prvobitni temeljni materijal i može se koristiti za posebne namjene. Naslojavanjem tkanina postaje kruća. Premaz ima svoja specifična svojstva i ispunjava prostore između niti i „ce-

mentira“ osnovu i potku u jednu cjelinu. Mehanička svojstva niti su promijenjena, a rotacija između niti je spriječena.

Ispitivanja naslojenih tekstilnih materijala odnose se na njihova fizikalno-mehanička svojstva: naprezanje, deformaciju, prekidnu silu, prekidno istezanje, modul elastičnosti, nepropusnost.

Dosadašnja istraživanja vezana za mehanička svojstva slikarskog platna

nisu opsežna zbog složenosti problema i ne daju sustavne podatke o tim svojstvima [1-4]. Zbog toga jer je teško dobiti ponovljive podatke mjerenja zbog inherentne stohastičke prirode slikarskog platna.

Slikarsko platno se može definirati kao kompozitna struktura koja se sastoji od niza heterogenih polimernih slojeva. Strukturna svojstva tkanog materijala slikarskog platna su rezultat kombinacije mnogih čimbenika. To uključuje: broj vlakana pređe, vrstu vlakana, čvrstoću vlakana, veličinu vlakana i pređe, količinu uvijene pređe, gustoću tkanine u smjeru osnove i potke, vrste vezova, nabiranje, obrade tkanine nakon tkanja, obrade prije bojanja ili naslojavanja. Trenje između vlakana i na mjestima križanja vlakana, zakrivljenost i savojna svojstva pređe imaju utjecaj na svojstva tkanine. Interakcija između svih tih čimbenika utječe na konačno ponašanje tekstilnog materijala u dijagramu opterećenje - produženje pod djelovanjem vlačne sile i to u smjeru osnove i potke. Opisujući geometriju veza i mehanička svojstva pojedinih pređa, razvijeni su teorijski modeli za predviđanje mehaničkih svojstava materijala. Osnovni model koji podupire mnoge složenije modele koji se i danas koriste za ispitivanje i određivanje mehaničkih karakteristika, razvio je Pierce [5]. To su kasnije razrađivali Kawabata [6], Hearle i sur. [7], Greenwood [8] i Warren [9] kombinirajući geometrijsku i mehaničku analizu. Pan je dao realnija predviđanja čvrstoće tkanine uključujući interakciju pređe [10], a Kilby je tkani materijal tretirao kao laminat kontinuuma [11] i model proširuje na nelinearan i uključuje ovisnost mehaničkih svojstava o vremenu, što je vrlo važno za realno modeliranje slikarskog platna. Također su provedena istraživanja tkanina u okviru vlaknima ojačanih kompozita [12]. Prilikom mjerenja, na mehanička svojstva tkanina utječu nelinearna viskoelastičnost, trenje između vlakana, pređe i u tkanini, odstupanja između udaljenosti i u gustoći tkanine, geometrijske promje-

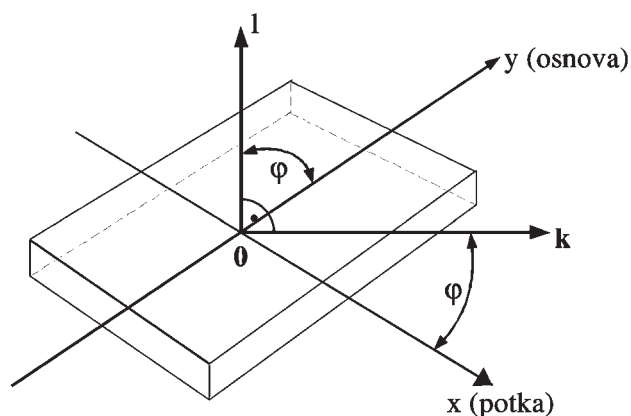
ne veza za vrijeme djelovanja vanjskih sila, te promjena temperature i vlažnosti [13]. Svojstva koja su značajna za slikarska platna su: anizotropija, nelinearno ponašanje krivulje naprezanje-deformacija, pužanje, ranija opterećenja koja utječu na dijagram naprezanje-deformacija [14]. U sklopu konzervacije odnosno očuvanja, navedena svojstava predložena su kao relevantni čimbenici slikarskih platna [15-17]. Provedeno je vrlo malo detaljnih istraživanja koja mogu objasniti koje će se karakteristike pojaviti ili imati značajan utjecaj na ponašanje platna.

Kada se kut djelovanja vanjskog opterećenja (vlačna sila) mijenja, mijenjaju se i elastične konstante. Tom problematikom tijekom godina bavili su se mnogi istraživači i konstruirani su mnogi složeni mjerni sustavi za mjerenje raznih mehaničkih karakteristika tkanina [18, 19]. Jednosno istezanje je najrašireniji postupak ispitivanja i analize fizikalnih i mehaničkih svojstava tekstilnih proizvoda [20]. Najčešće se izvodi korištenjem bilo standardnih ili prilagođeno-dizajniranih instrumenata. Tekstilni plošni materijali se u pogledu strukturnih karakteristika definiraju kao elastične ortotropne ploče s dvije međusobno okomite ravnine elastične simetrije. Te ravnine elastične simetrije su ravnine ortotropije, a njihovi presjeci su glavne osi. Os x je u smjeru potke, a os y je u smjeru osnove, sl.1.

Teorijska analiza ponašanja tkanina zbog njenih anizotropnih svojstava je često vrlo složena, pa je eksperimentalna provjera teoretskih predviđanja kod njih važnija nego kod drugih materijala. Funkcionalna veza između naprezanja i deformacija ne može se odrediti teorijski, već samo eksperimentalno ispitivanjem uzoraka izrađenih od određenog materijala. Izvest će se pokusi na rastezanje uzorka naslojene tkanine pri statičkom opterećenju. Pri tom ispitivanju dobije se najviše podataka o mehaničkim svojstvima materijala (tkanina). Ispitana je anizotropija sirovog slikarskog platna, slikarskog platna s izolacijom i preparacijom 1., 2. i 3. sloja u odnosu na mehanička svojstva: prekidnu silu, prekidno istezanje, prekidno suženje, rad do prekida i inicijalni modul elastičnosti pri različitim kutovima djelovanja vlačne sile.

2. Teorijske osnove anizotropnih materijala

Za opisivanje ovisnosti značajki čvrstoće koristi se 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 [21, 22], (sl. 1). Za elastične ortotropne materijale postoji izraz za izračunavanje modula elastičnosti E_{φ} (kPa) kada sila istezanja djeluje na tkaninu u proizvoljnim smjerovima:



Sl.1 Element ortotropne ploče - tkanine

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

Jednadžba (1) daje matematičku vezu između modula elastičnosti za bilo koji smjer djelovanja vlačne sile i $E_x = E_{0^\circ}$, $E_y = E_{90^\circ}$ i E_{45° .

Kut φ je kut između glavne osi x (smjer potke) i smjera djelovanja vlačne sile, sl.1). Vrijednosti modula elastičnosti E_{45° , E_x i E_y dobiju se ispitivanjima u laboratoriju pri jednoosnom istezanju uzorka kada vlačne sile djeluju u smjerovima $\varphi=0^\circ$, 45° , 90° .

Pri djelovanju aksijalnih vlačnih sila F u proizvoljnim smjerovima dolazi do pojave normalnih naprezanja $\sigma=F/A$ (MPa), koja se mijenjaju ovisno o smjeru djelovanja sile. A (mm²) je površina poprečnog presjeka na koju djeluje sila. Najveće vrijednosti tih aksijalnih sila pri kojima dolazi do prekida naslojenih tkanina su prekidne vlačne sile F_φ (N).

Zbog varijacije vrijednosti prekidnih sila F_φ , prekidnih istezanja ε_φ i rada do prekida W_φ u različitim smjerovima, definiraju se koeficijent anizotropije K_{AF} , $K_{A\varepsilon}$, K_{AW} i K_{AE} za što preciznije određivanje stupnja anizotropije. Za izotropne materijale koeficijent anizotropije iznosi jedan ($K_i=1$) što pokazuje da su fizikalno-mehanička svojstva, sile i čvrstoće u različitim smjerovima jednake. Kod anizotropnih materijala zbog varijacije fizikalno-mehaničkih svojstava materijala, prekidnih sila, itd. u različitim smjerovima vrijednost koeficijenta anizotropije raste i veća je od jedan ($K_i>1$). Materijali kod kojih je anizotropija više izražena imaju veću vrijednost K_i (tj. raspon izmjerenih vrijednosti između najviše i najniže vrijednosti raste).

Kao pokazatelj anizotropije za prekidne sile tkanine K_{AF} koristi se izraz (2):

$$K_{AF} = \frac{F_{\varphi \max}}{F_{\varphi \min}} \quad (2)$$

gdje su $F_{\varphi \max}$ - najviša vrijednost prekidne sile, $F_{\varphi \min}$ - najniža vrijednost prekidne sile u istom uzorku tkanine.

Za preciznije određivanje anizotropije istezanja tkanine $K_{A\varepsilon}$ koristi se izraz (3):

$$K_{A\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\varphi \max}}{\varepsilon_{\varphi \min}} \quad (3)$$

gdje su $\varepsilon_{\varphi \max}$ - maksimalno istezanje (%), $\varepsilon_{\varphi \min}$ - minimalno istezanje (%). Određivanje anizotropije rada do prekida K_{AW} je prikazano izrazom (4):

$$K_{AW} = \frac{W_{\varphi \max}}{W_{\varphi \min}} \quad (4)$$

gdje su $W_{\varphi \max}$ - maksimalan rad do prekida (Nm), $W_{\varphi \min}$ - minimalan rad do prekida (Nm).

Određivanje koeficijenta anizotropije za inicijalne module elastičnosti K_{AE} u proizvoljnim smjerovima je dano izrazom (5):

$$K_{AE} = \frac{E_{\varphi \max}}{E_{\varphi \min}} \quad (5)$$

gdje su $E_{\varphi \max}$ - maksimalan inicijalni modul elastičnosti (kPa), $E_{\varphi \min}$ - minimalan inicijalni modul elastičnosti (kPa).

3. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu rada izvedeni su pokusi rastezanja uzorka lanene tkanine i naslojenih tkanina pri statičkom opterećenju. Pri tom ispitivanju određene su veličine vlačnih sila i pripadna produljenja (istezanja) te su dobiveni podaci o prekidnim silama, prekidnim istezanjima i radu pri prekidu. U tu svrhu primijenjene su klasične metode i instrumenti za ispitivanje vlačnih svojstava tkanina. Pomoću rezultata ispitivanja izračunati su inicijalni moduli elastičnosti ovisno o smjeru djelovanja vlačne sile na uzorke te faktori anizotropije. Eksperiment je proveden mjerenjem deformacije sirove tkanine i naslojenih tkanina pri djelovanju vlačne sile do prekida i to za uzorke koji su izrezani u smjeru potke ($\varphi=0^\circ$), u smjeru osnove ($\varphi=90^\circ$), te pod kutovima 15° , 30° , 45° , 60° , 75° .

Provedenim eksperimentom se želi odrediti utjecaj naslojavanja i broj slojeva na stupanj anizotropije, veličinu modula elastičnosti, vrijednosti

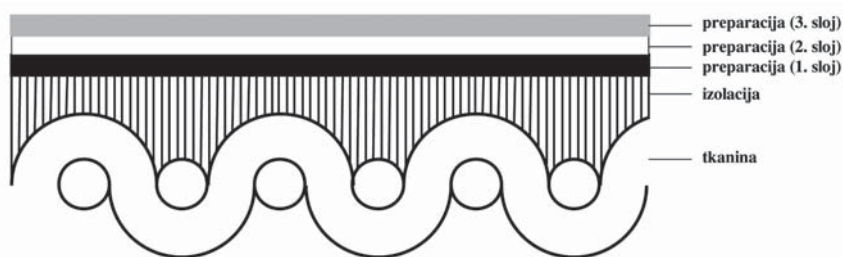
prekidnih sila, prekidnih istezanja i rada do prekida.

3.1. Postupci naslojavanja

U slikarskoj tehnologiji postoje tri osnovna jednakovrijedna elementa: bojilo, vezivo i podloga. Slika se sastoji od podloge na koju je vezivom nanoseno bojilo. Podloga je pripremljena površina koja je temelj na kojem počinje likovna gradnja. Sastoji se od nositelja slike (površine na koju je moguće slikati kao što je npr. platno, papir, staklo, itd.) i osnove (preparacije odnosno grunda; pripremljenog sloja koji se nanosi na nositelja slike). Lanena tkanina kao nositelj u slikarstvu traži određenu obradu, uključujući i specifičnu preparaciju. Negativni utjecaj celuloze i ostalih primjesa u lanenom vlaknu (osim voska) na otpornost, postojanost i trajnost lanenog tkanja umanjuje se odgovarajućom pripremom nosioca i pravilnom zaštitom od utjecaja negativnih faktora. To se postiže adekvatnim izolacijama i preparacijama platna, koje mogu bitno utjecati na trajnost same slike te produžiti njen vijek.

S obzirom na to da je laneno platno kao nosilac kemijski aktivno, najprije se obrađuje metodom izolacije odnosno impregnacije čime se zaštićuje podloga, tj. niti platna od djelovanja veziva koje prodiru iz bojila ili preparacije, (sl.2) [23-24]. Sve poroznije vrste nosilaca potrebno je prije nanošenja preparacije izolirati protiv prevelikog upijanja i zaštititi od negativnih svojstava nekih organskih veziva na materiju nositelja.

Osnova u slikarstvu (preparacija ili *grund*; pripremljeni sloj koji se nanosi na nositelj slike) je jedan od fundamentalnih elemenata štafelajske slike. Nanošenjem osnove ili preparacije u slikarstvu obrađuje se površina nositelja u nekoliko slojeva čime navedeni pripremljeni sloj fizički djeluje kao posrednik između nositelja i slikanog sloja radi osiguravanja stabilnosti sloja boje, zaštite od vanjskih utjecaja te od veziva iz bojila, a ujedno omogućava i čvršće vezivanje slikanog sloja. Sloj preparacije/osnove ili grund



Sl.2 Shematski prikaz slikarskog platna

se najčešće sastoji od veziva i punila. Nanosi se na nositelja slike te ima višestruku funkciju: uspostavljanje uvjeta za dobro vezanje bojila i veziva za podlogu (nositelj), izolacija poroznih nosilaca i zaštita od negativnih utjecaja pojedinih veziva iz slikanog sloja (ulja, smole itd.), regulacija upojnosti veznog sredstva iz slikanog sloja te odgovarajuća bjelina odnosno obojenost. Trajnost platna, pa i slike ovisi o izboru punila i veziva, o njihovom priređivanju i načinu izvedbe. Dobro preparirano platno kao slikarska podloga mora imati sljedeća svojstva: glatku površinu, dobru upojnost da bi se slojevi bojila i veziva dobro povezali s podlogom, savitljivost, elastičnost prepariranog platna i neutralnost prepariranog platna prema gornjim slojevima bojila [25].

Za izolaciju odnosno impregnaciju lanenog platna priprema se 500 ml 7%-tne tutkalne otopine za što je potrebno 35 g životinjskog tutkala i 500 ml vode.

Postupak izolacije: Kao izolator se koristi ono vezivo koje će se kasnije koristiti i kao vezivo preparacije - životinjsko tutkalo. U manjoj količini vode tutkalo bubri oko 8 sati, nakon čega se nabubreno tutkalo otapa na vodenoj kupelji na temperaturi od 45 °C. Platno se impregnira najčešće toplom tutkalnom otopinom (45 °C). Tutkaljenjem se niti platna zaštićuju od djelovanja veziva koje prodire iz bojila ili preparacije. Također, tutkalo učvršćuje i smanjuje utjecaj vlage na platno. Da tutkalo ne bi potpuno namočilo niti platna i previše ih nakon sušenja ukrotilo, platno se može prethodno navlažiti hladnom vodom. Za nemasne osnove; posne preparacije

koje su tradicionalna varijanta klasičnih preparacija, a prema starijim recepturama najčešće sadrže samo punilo i vezivo te eventualno bjelilo, dovoljan je jedan sloj izolacije. Za one koje sadrže ulje potrebna je bolja izolacija [25].

Za prepariranje/pripremu lanenog platna (tutkalno krednu preparaciju) potrebno je 35 g kožnog tutkala, 500 ml vode, 350 g punila (šampanjske krede, kalcijeve karbonata CaCO_3) i 175 g bjelila (titanova bjelila) koji joj daju potrebnu gustoću, bjelinu, sposobnost upijanja i vezivanja bojila.

Postupak prepariranja/pripreme lanenog platna: U tutkalnu otopinu koja se već koristila za izolaciju zagrijava se na 45 °C postupno se dodaje punilo, najbolje pomoću sita, sve do onog trenutka dok na površini tutkalne otopine počne plivati tanki sloj punila. Ovako zasićena otopina punilom miruje neko vrijeme kako bi svi zračni mjehurići iz punila mogli izaći, a zatim se oprezno izmiješa i procijedi kroz gusto sito. Rupice na osušenom sloju preparacije mogu se pojaviti i zbog nanošenja prevruće preparacije. Ova preparacija nanosi se mlakom metodom nanošenja. Prema želji, preparaciji se može dodati i bjelilo u omjeru s punilom 1:2. Nanose se tri sloja preparacije. Nakon nanošenja prvog sloja kistom, platno se suši na zračnom mjestu. Prije stavljanja drugog nanosa, navlaži se mokrom spužvom da ne upije vezivo iz drugog sloja i time ga oslabi. Potezi drugog sloja nanose se u suprotnom smjeru (unakrsno) od poteza prvog sloja. Treći sloj se također nanosi u suprot-

nom smjeru od drugog sloja nakon sušenja istog [25].

3.2. Uzorci za ispitivanje

Za provođenje ovog istraživanja na raspolaganju su bila četiri uzorka. Za istraživanje mehaničkih svojstava za izradu slikarskih platna odabrana je sirova tkanina (S0) platnenog veza, sirovinskog sastava 100 % lan, gustoća tkanine u smjeru osnove i potke iznosila je 15 niti/cm, finoća pređe je 100 tex, plošna masa tkanine je 262 g/m², debljina tkanine je 0,51 mm. Nanošenjem izolacije i jednog sloja preparacije na sirovu tkaninu dobiva se uzorak za ispitivanje (S1) plošne mase 386 g/m² i debljine 0,76 mm. Zatim, nanošenjem na sirovu tkaninu izolacije i dva sloja preparacije pripremljen je uzorak za ispitivanje s oznakom (S2) plošne mase 421 g/m² i debljine 0,83 mm. I na kraju nanošenjem na sirovu tkaninu izolacije i tri sloja preparacije pripremljen je uzorak za ispitivanje s oznakom (S3) plošne mase 453 g/m² i debljine 0,89 mm. Finoća pređe određena je gravimetrijskom metodom prema normi HRN ISO 2060:1994. Gustoća tkanine ispitivana je prema normi HRN ISO 7211-2:1984. Određivanje debljina tkanine je definirano normom HRN ISO 5084:1996. Početno stanje uzoraka S0, S1, S2 i S3 za ispitivanje snimljeno je digitalnim mikroskopom Dino-Lite model AM4113T s povećanjem 50x uz reflektirano LED svjetlo, sl.3.

Za ispitivanje vlačnih svojstava izrezani su standardni uzorci dimenzija 300 x 50 mm, ukliješteni u stezaljke uređaja na razmaku od 200 mm, te izloženi jednoosnom vlačnom opterećenju do postizanja prekida. Uzorci su rezani u sedam različitih smjerova: u smjeru potke ($\varphi=0^\circ$), smjeru osnove ($\varphi=90^\circ$), te pod kutovima 15°, 30°, 45°, 60°, 75° prema potki. Smjer djelovanja vlačne sile tijekom izvođenja pokusa je uvijek jednak. Za svaki navedeni smjer rezanja uzorka, provedeno je pet ispitivanja. Vlačna svojstva svih uzoraka ispitivana su prema HRN EN ISO 13934-1:2008

metodom ispitne trake na uređaju za mjerenje čvrstoće tkanine, tj. na dinamometru.

Za ispitivanje korišten je dinamometar Statimat M njemačkog proizvođača Textechno. Dinamometar Statimat M je potpuno automatizirani, mikroprocesorski upravljani statički dinamometar koji radi na principu konstantne brzine deformacije. Kod ispitivanja postavljeni su sljedeći uvjeti: razmak između stezaljki: 200 mm, brzina povlačenja: 100 mm/min.

3.3. Prikaz rezultata ispitivanja

Dijagrami sila-istezanja (F - ϵ) srednjih vrijednosti rezultata ispitivanja djelovanja vlačne sile F i pripadne uzdužne deformacije (istezanja) ϵ za uzorke koji su izrezani pod kutovima 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° i 90° u odnosu potku prikazani su na sl.4-7.

Također je mjereno i bočno suženje tkanine pri prekidu [26]. Srednje vrijednosti prekidne sile F_φ (N), pripadnog prekidnog istezanja ϵ_φ (%), suženja kod prekida ϵ_p (%) i rada do prekida W_φ (Nm) za različite smjerove rezanja uzoraka S0, S1, S2 i S3 prikazane su u tab.1.

Polarni dijagram je dvodimenzionalni koordinatni sustav u kojemu je svaka točka određena pomoću udaljenosti od fiksne točke (pola 0) i kutom od odabranog fiksnog smjera. Udaljenost od pola naziva radijalna koordinata ili radijus, a kut je kutna koordinata, tj. polarni kut. Radijalne koordinate predstavljaju srednje vrijednosti prekidne vlačne sile, prekidnog istezanja, prekidnog suženja i rada do prekida ovisno o smjeru rezanja uzoraka.

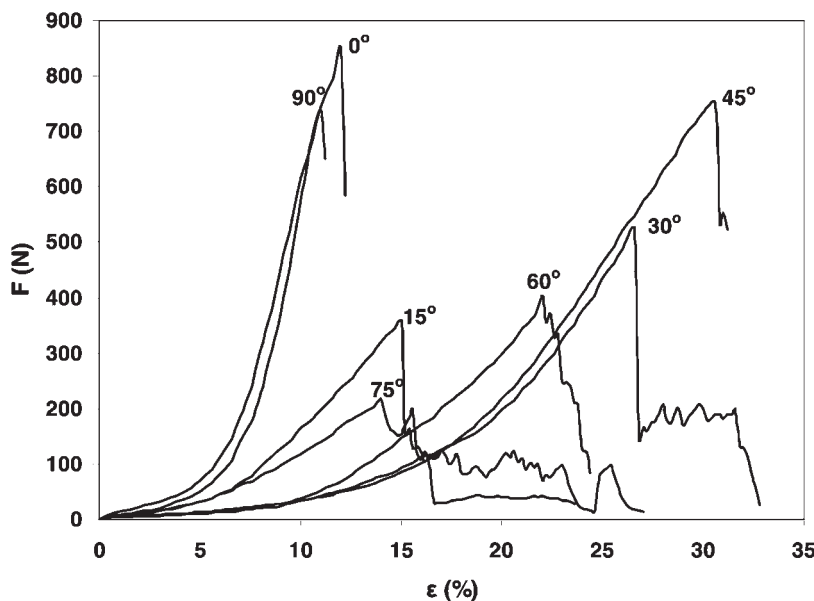
Na sl.8 su polarnim dijagramom prikazane srednje vrijednosti uzdužne deformacije (prekidnog istezanja) ϵ_φ i poprečne deformacije (prekidnog bočnog suženja) ϵ_p u ovisnosti o smjeru rezanja uzoraka. Vrijednosti poprečne deformacije (prekidnog suženja) su uvijek suprotnog predznaka od vrijednosti uzdužne deformacije (prekidnog istezanja).

Svi ispitani uzroci imaju najveće produljenje i najveće suženje kada su uzorci rezani pod kutom $\varphi=45^\circ$ u odnosu na smjer potke, sl.8. Vrijednosti prekidnog istezanja i prekidnog suženja uzoraka, sl. 8a i sl.8b, povećavaju se od smjera potke ($\varphi = 0^\circ$) u kutu od 15° , a nakon tog kuta vrijednosti prekidnog istezanja brzo rastu i imaju maksimalnu vrijednost pri kutu 45° . S daljnjim povećanjem kuta φ , vrijednosti ϵ_φ brzo padaju od kuta 45°

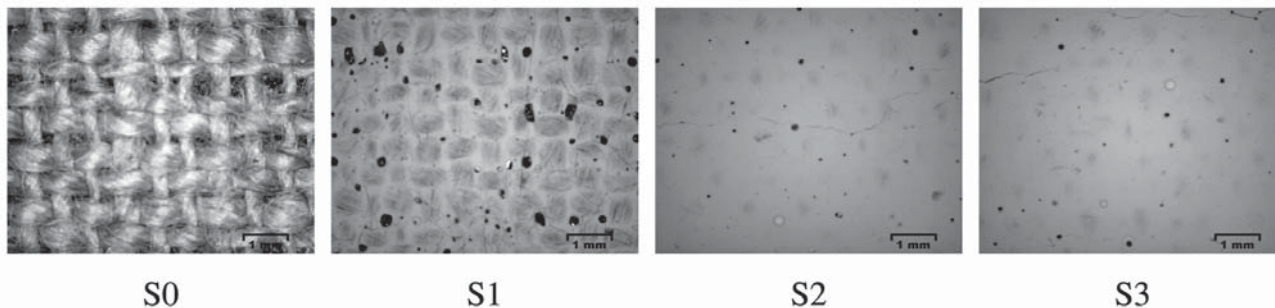
prema kutu od 75° stupnjeva. Nakon toga kuta, prekidno istezanje se neznatno smanjuje do smjera osnove ($\varphi = 90^\circ$).

Polarnim dijagramom, (sl.9a), prikazane su varijacije srednjih vrijednosti veličina prekidnih sila F_φ u ovisnosti o kutu rezanja uzoraka, a na sl.9b polarnim dijagramom je dan prikaz rada do prekida W_φ u ovisnosti o kutu rezanja uzoraka u odnosu na smjer potke.

S porastom broja slojeva na temeljnu tkaninu rastu vrijednosti prekidnog izduženja, prekidnog suženja, prekidnih sila i rada do prekida. Smjer (kut) rezanja uzoraka utječe na veličinu prekidne sile. Najveća vrijednost prekidne sile za sve uzorke je kada su uzorci izrezani u smjeru potke $\varphi=0^\circ$, zatim u smjeru osnove $\varphi=90^\circ$. To se



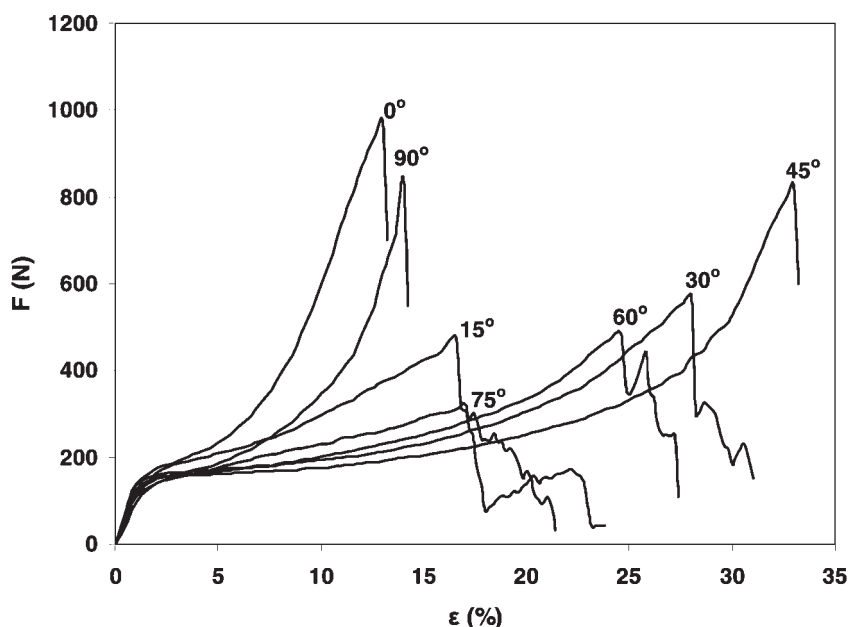
Sl.4 Dijagram F- ϵ (sila-istezanje) za uzorak S0



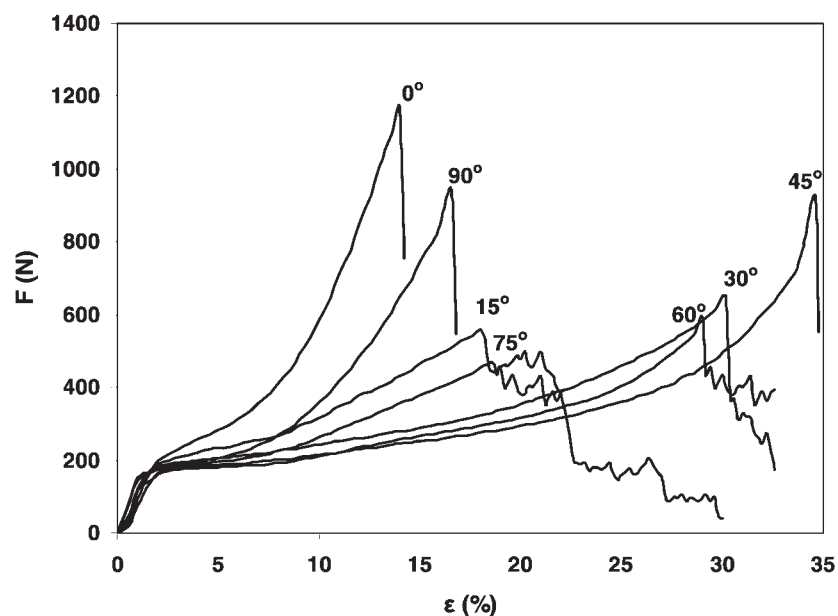
Sl.3 Početno stanje uzoraka uz povećanje 50x

Tab.1 Srednje vrijednosti prekidnog istežanja, suženja kod prekida, prekidne vlačne sile i rada do prekida

$\varphi(^{\circ})$	S0				S1				S2				S3			
	ε_{φ}	ε_p	F_{φ}	W_{φ}	ε_{φ}	ε_p	F_{φ}	W_{φ}	ε_{φ}	ε_p	F_{φ}	W_{φ}	ε_{φ}	ε_p	F_{φ}	W_{φ}
0	12,1	2,0	851,6	6,2	12,8	3,0	971,3	9,0	14,2	3,9	1162,6	10,6	15,9	4,9	1319,3	12,1
15	14,9	5,0	357,9	1,2	16,3	5,9	470,2	4,2	17,7	6,9	556,6	7,3	18,8	8,8	634,8	9,4
30	26,1	23,6	520,4	6,8	28,1	25,8	567,2	11,9	29,0	27,6	642,3	15,2	32,0	29,9	712,6	20,0
45	30,5	28,5	749,1	12,5	33,1	32,4	823,6	22,2	34,3	34,5	918,5	27,3	37,7	37,9	1000,2	29,7
60	21,6	19,7	403,6	4,2	24,5	21,8	483,5	7,8	28,5	25,9	593,7	16,8	31,2	28,5	654,1	19,4
75	14,1	4,0	212,2	3,2	16,8	5,9	318,9	7,0	18,5	7,9	464,4	10,0	21,3	12,0	581,3	14,5
90	10,9	2,0	761,0	6,7	13,7	3,0	836,1	10,1	16,0	4,9	928,7	13,1	17,0	5,9	1081,1	15,3



Sl.5 Dijagram F-ε (sila-istežanje) za uzorak S1



Sl.6 Dijagram F-ε (sila-istežanje) za uzorak S2

objašnjava time što se kod tkanja osnovine niti više napinju nego potki-
ne niti, (sl.9a). Veličine prekidnih sila
za ispitivane uzroke koji su rezani u
drugim smjerovima u odnosu na pot-
ku su manje, jer se broj niti koje su
istovremeno zahvaćene u obje ste-
zaljke dinamometra smanjuje. Za
komplementarne kutove 15° i 75°
vrijednosti prekidne sile su manje
nego za komplementarne kutove 30°
i 60°, jer se smjer djelovanja sile i
uklještenih niti gotovo podudara,
dakle niti se izvlače gotovo pravocrt-
no. Za kut 45° prekidna sila se po-
većava u odnosu na kutove 15°, 30°,
60° i 75° jer se smjer sile ne poduda-
ra sa smjerom niti pa je zbog toga po-
trebna veća sila.

Rad do prekida W_{φ} izračunat je da bi se
karakterizirala prekidna svojstva uzro-
ka u području veće deformacije. Iz
rezultata prikazanih na sl.9b vidljivo je
da su najveće vrijednosti rada do preki-
da za uzorke S2 i S3. Za uzorak S0 je
potrebno utrošiti najmanje energije,
ima najmanji rad do prekida i najslabija
je za preuzimanje vlačne sile.

Na temelju eksperimentalno dobive-
nih vrijednosti prekidnih sila F_{φ} ,
prekidnog istežanja ε_{φ} i rada do preki-
da W_{φ} iz tab.1 i pomoću izraza (2), (3)
i (4) izračunati su koeficijenti anizo-
tropije prekidnih sila K_{AF} , prekidnog
istežanja i suženja $K_{A\varepsilon}$ i rada do preki-
da K_{AW} čije su vrijednosti prikazane u
tab.2.

Prema rezultatima u tab.2 najveće
koeficijente anizotropije $K_{A\varepsilon\varphi}$, $K_{A\varepsilon p}$,
 K_{AF} , K_{AW} ima uzorak S0 i on se
smanjuje s brojem nanesenih sloje-
va.

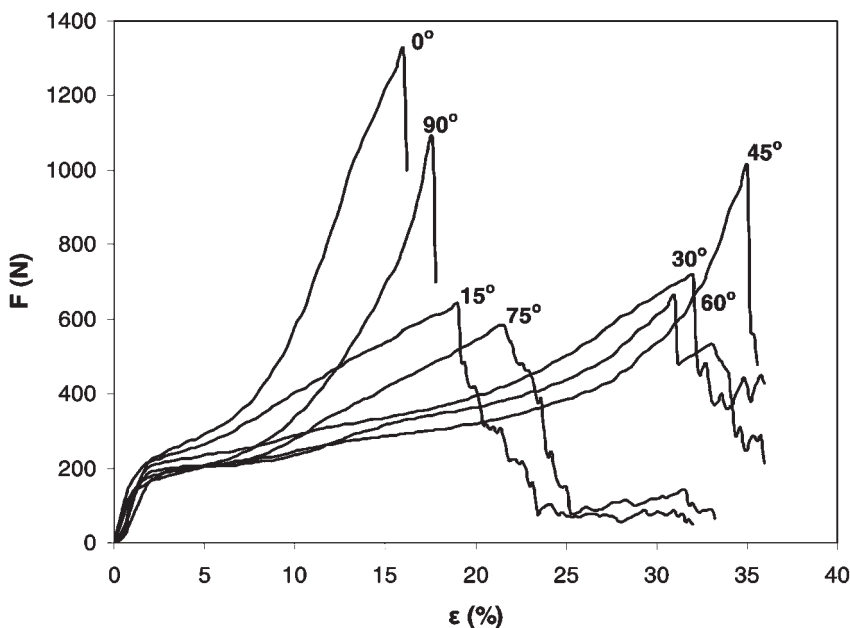
Na sl.10 je prikazano stanje ispitanih uzoraka S0, S1, S2 i S3 neposredno nakon prekida uz povećanje 50x kada su uzorci izrezani u smjeru potke ($\varphi=0^\circ$), pod kutom od 45° i u smjeru osnove ($\varphi=90^\circ$). Pukotine nanosenog sloja u smjeru potke ($\varphi=0^\circ$) i u smjeru osnove ($\varphi=90^\circ$) su uvijek okomite na smjer djelovanja sile, a pod kutom od 45° pukotine nanosenog sloja su nedefiniranog smjera zbog promjene vrijednosti kuta križanja između sustava niti osnove i potke. Kod iste-

zanja uzoraka u smjeru koji nije po osnovi ili potki, niti na početnom stupnju pokazuju posmično naprezanje. Svi ispitani uzorci imali su mjesto prekida u sredini uzorka ili uz

klemu pa je stanje uzorka mikroskopski snimljeno na udaljenosti 1/4 uklještene duljine uzorka od donje kleme.

Tab.2 Koeficijenti anizotropije za eksperimentalno dobivene vrijednosti prekidnog istežanja ε_p , prekidnog suženja ε_p , prekidne sile F_p , i rada do prekida W_p

Oznaka uzorka	$K_{A\varepsilon p}$	$K_{A\varepsilon p}$	K_{AF}	K_{AW}
S0	2,79	14,48	4,01	10,37
S1	2,58	10,93	3,05	5,35
S2	2,42	8,76	2,50	3,74
S3	2,38	7,67	2,27	3,15



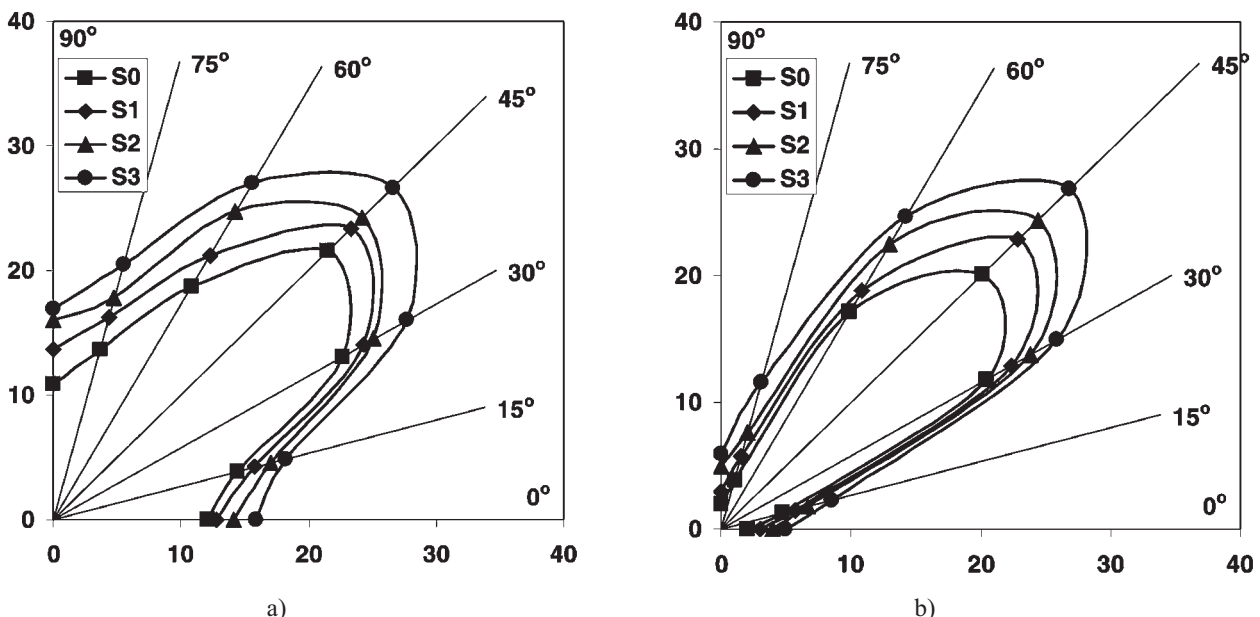
Sl.7 Dijagram F-ε (sila-istežanje) za uzorak S3

4. Određivanje inicijalnih modula elastičnosti

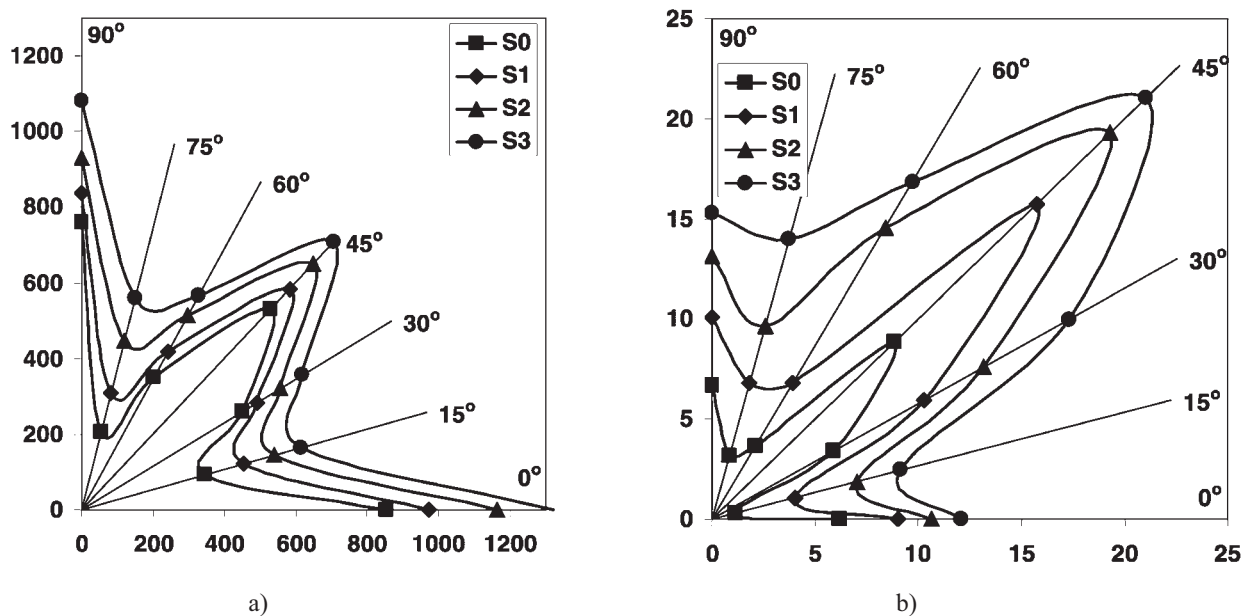
Na temelju eksperimentalno dobivenih krivulja sila-istežanje dobivene su vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti koje će se usporediti s pripadnim računskim vrijednostima, te izračunati odstupanje u postocima.

4.1. Eksperimentalne vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti

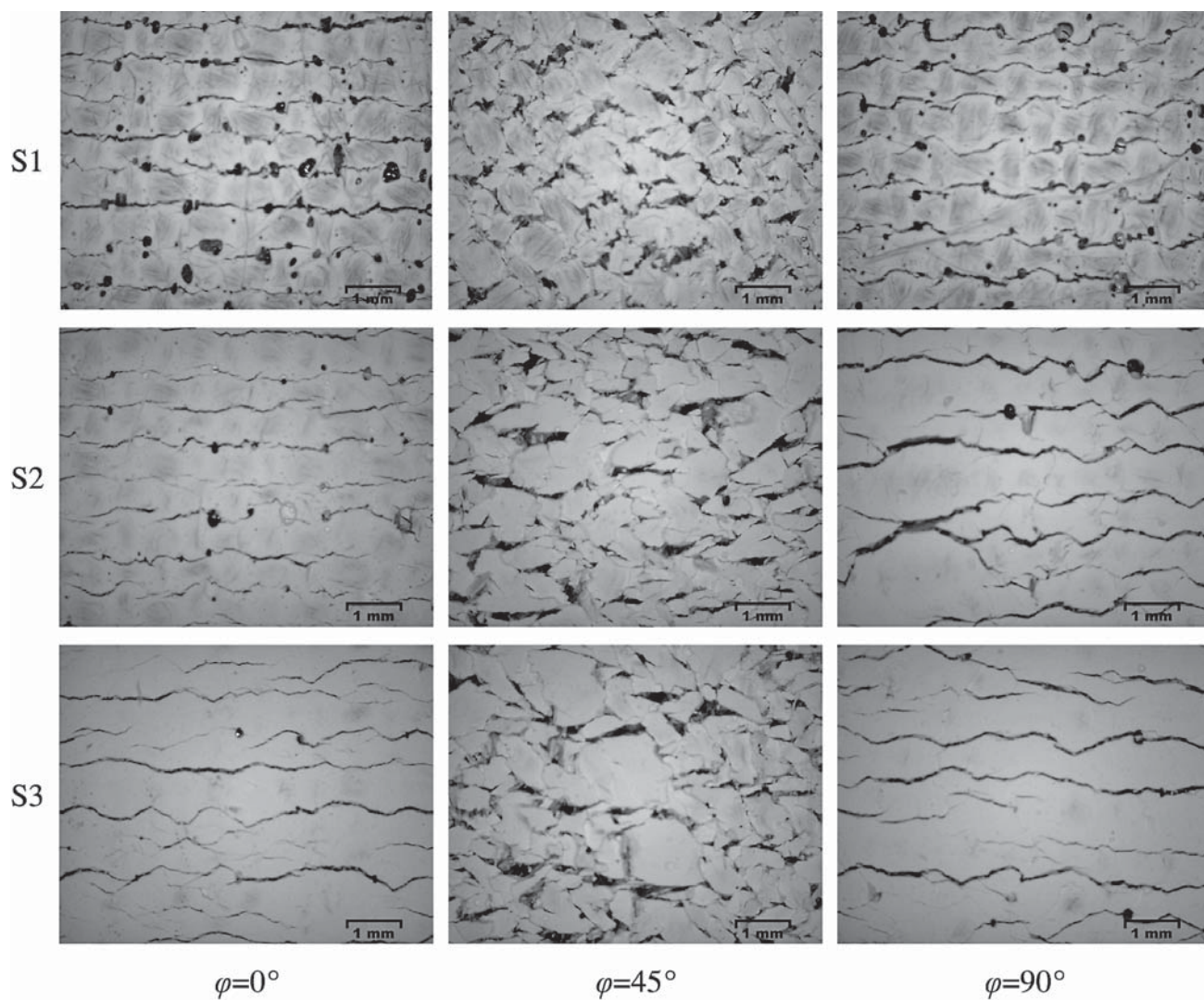
Iz prikazanih dijagrama, (sl.4-7) koriste se vrijednosti vlačne sile u elastičnom linearnom području. Inicijalni modul elastičnosti E_p određen je iz prvog linearnog područja na krivulji sila-istežanje (F-ε) koje se određuje praćenjem eksperimentalnih podataka pomoću regresijske kontrolne



Sl.8 Polarni dijagram: a) prekidno istežanje uzorka ε_p (%), b) prekidno suženje uzorka ε_p (%) u ovisnosti o kutu djelovanja sile



Sl.9 Polarni dijagram: a) prekidne sile F_ϕ (N), b) rada do prekida W_ϕ (Nm) u ovisnosti o kutu djelovanja sile



Sl.10 Stanje uzoraka S0, S1, S2, S3 neposredno nakon prekida uz povećanje 50x izrezanih pod kutovima 0°, 45°, 90°

karte, odnosno pravca regresije [27]. U tom području linearan je odnos sile, odnosno naprezanja i istežanja. Inicijalni modul elastičnosti E_φ definiše se kao nagib krivulje naprezanje-istežanje u linearnom području elastičnih deformacija gdje vrijedi Hookeov zakon za jednoosno stanje naprezanja [28].

$$E_\varphi = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{\varepsilon \cdot b \cdot d} \quad [Pa] \quad (6)$$

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

Koristeći vrijednosti F i ε u elastičnom području i izraz (6) izračunavaju se srednje vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti E_φ u odnosu na proizvoljni smjer rezanja uzoraka. Na krivulje naprezanje-istežanje (σ - ε) u elastičnom području, tj. u linearnom dijelu postave se linearne regresijske jednadžbe [21, 22, 28]. Nagib krivulje, odnosno koeficijent smjera pravca predstavlja modul elastičnosti E_φ .

Eksperimentalno dobivene vrijednosti modula elastičnosti E_φ u ovisnosti o promjeni kuta rezanja uzoraka u odnosu na smjer potke dane su u tab.3, a grafički su prikazane za svakih 15° polarnim dijagramom na sl.11.

Eksperimentalne vrijednosti modula elastičnosti E_φ se povećavaju s brojem nanesenih slojeva. Za uzorak S0 najveći moduli elastičnosti su u smjeru osnove i potke. Razlike između vrijednosti E_φ za uzorke S1, S2 i S3 u različitim smjerovima se smanjuju. Najmanja razlika između vrijednosti modula elastičnosti E_φ u različitim smjerovima je za uzorak S3, koji ima najveći broj slojeva na sirovom platnu.

4.2. Računske vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti

Na temelju eksperimentalnih vrijednosti $E_{0^\circ} = E_x$, $E_{90^\circ} = E_y$ i E_{45° iz tab.3 i

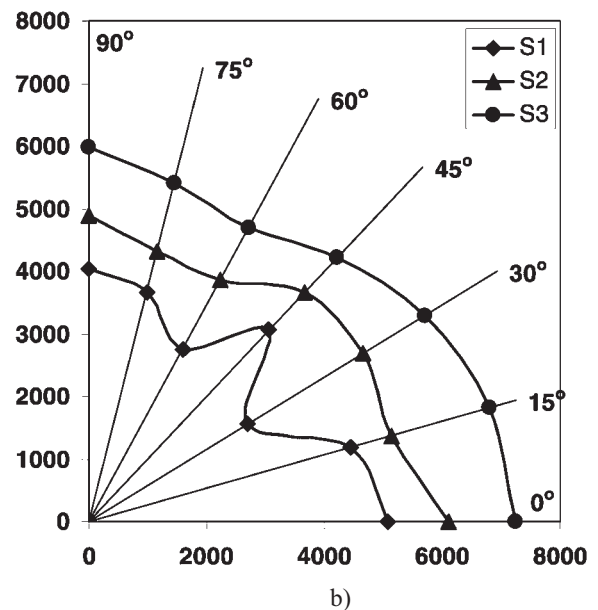
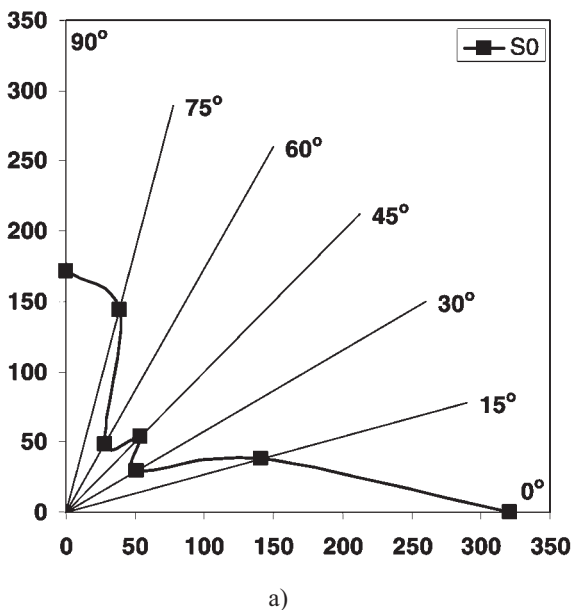
pomoću izraza (1) izračunate su vrijednosti modula elastičnosti E_φ u ovisnosti o promjeni kuta rezanja uzoraka S0, S1, S2 i S3 u odnosu na potku. U tab.4 prikazane su računski dobivene vrijednosti modula elastičnosti za različite kutove rezanja uzoraka (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° i 90°).

Polarni dijagram računskih vrijednosti modula elastičnosti E_φ (kPa) za svakih 5° je prikazan na sl.12.

U tab. 5 su prikazana odstupanja u postocima između eksperimentalnih vrijednosti (tab.3) i računskih vrijednosti (tab.4) inicijalnih modula elastičnosti E_φ . Odstupanja D (%) su izračunata prema izrazu (7):

$$D = \frac{E_{\varphi,eks} - E_{\varphi,rac}}{E_{\varphi,eks}} \cdot 100 (\%) \quad (7)$$

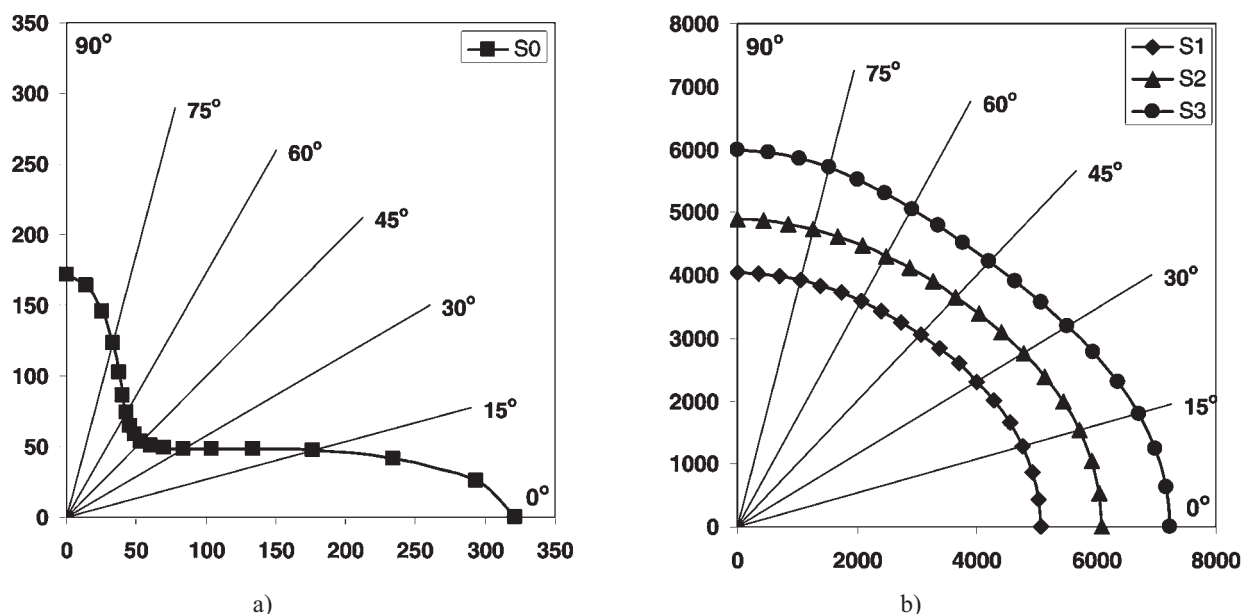
U smjeru osnove (90°), potke (0°) i pod kutom d 45° razlike u postocima između eksperimentalnih i računskih vrijednosti inicijalnih modula



Sl.11 Polarni dijagram: eksperimentalne vrijednosti modula elastičnosti E_φ (kPa) za svakih 15° : a) S0, b) S1, S2, S3

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

Oznaka uzorka	E_{0°	E_{15°	E_{30°	E_{45°	E_{60°	E_{75°	E_{90°
S0	321,2	145,8	59,3	75,8	56,3	149,3	171,1
S1	5082,3	4594,4	3109,8	4331,5	3186,4	3794,6	4036,4
S2	6099,4	5313,9	5368,6	5168,1	4464,2	4477,4	4885,7
S3	7238,1	7035,1	6577,1	5952,7	5414,0	5598,8	5984,9



Sl.12 Polarni dijagram: računске vrijednosti modula elastičnosti E_φ (kPa) za svakih 5° : a) S0, b) S1, S2, S3

Tab.4 Računske vrijednosti modula elastičnosti E_φ (kPa)

Oznaka uzorka	E_{0°	E_{15°	E_{30°	E_{45°	E_{60°	E_{75°	E_{90°
S0	321,2	182,7	96,8	75,8	85,5	127,6	171,1
S1	5082,3	4942,4	4630,3	4331,5	4141,5	4057,1	4036,4
S2	6099,4	5918,1	5524,4	5168,1	4965,7	4896,1	4885,7
S3	7238,1	6947,4	6372,8	5952,7	5834,9	5917,4	5984,9

Tab.5 Odstupanja D u (%) između eksperimentalnih i računskih vrijednosti E_φ

Oznaka uzorka	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
S0	0	-25,28	-63,38	0	-52,00	14,54	0
S1	0	-7,57	-48,89	0	-29,97	-6,92	0
S2	0	-11,37	-2,90	0	-11,23	-9,35	0
S3	0	1,25	3,11	0	-7,78	-5,69	0

Tab.6 Koeficijenti anizotropije za eksperimentalno i računski dobivene vrijednosti E_φ

Oznaka uzorka	$K_{AE} - \text{exp.}$	$K_{AE} - \text{rač.}$
S0	5,71	4,24
S1	1,63	1,26
S2	1,37	1,25
S3	1,34	1,24

elastičnosti E_φ su 0%. To slijedi iz jednadžbe (1) zbog periodičnosti funkcija sin i cos. Negativne vrijednosti odstupanja pokazuju da su dobivene računске vrijednosti E_φ veće od eksperimentalnih vrijednosti E_φ . S porastom broja slojeva se smanjuju odstupanja između eksperimentalnih i računskih vrijednosti E_φ i za uzorak S3 odstupanja su minimalna. Vrijednosti koeficijenta anizotropije modula elastičnosti K_{AE} izračunate su

pomoću eksperimentalno i računski dobivenih vrijednosti inicijalnih modula elastičnosti E_φ iz tab.3 i tab.4 pomoću izraza (5) i prikazane su u tab.6. Koeficijent anizotropije modula elastičnosti K_{AE} se smanjuje s povećanjem broja slojeva. Kada se smanjuje anizotropnost materijala, vrijednosti modula elastičnosti E_φ leže na krivulji koja se približava četvrtini kruga, što je karakteristika izotropnih

materijala, (sl.12 i 13). Dakle, s promjenom broja slojeva mijenjaju se mehaničke karakteristike materijala. S porastom broja slojeva rastu vrijednosti modula elastičnosti, prekidne sile, prekidno istežanje i rad do prekida.

5. Zaključak

Slikarsko platno je naslojeni materijal koji se može definirati kao ortotropni materijal za koji se u elastičnom području može primijeniti Hookeov zakon za anizotropno ponašanje materijala pri proračunu modula elastičnosti kada vlačna sila djeluje na uzorke koji su rezani u proizvoljno odabranim smjerovima u odnosu na potku. Mehanička svojstva tekstilnog materijala se značajno poboljšavaju

nanošenjem više slojeva premaza. Stoga, slikarsko platno ima značajno poboljšana svojstva u odnosu na prvobitni temeljni materijal. Koeficijenti anizotropije modula elastičnosti, prekidnih sila, prekidnog istezanja i rada do prekida se smanjuju s povećanjem broja slojeva. Može se zaključiti da se s povećavanjem broja nanešenih slojeva smanjuje anizotropnost materijala i slikarsko platno poprima karakteristike izotropnog materijala. Vrijednosti modula elastičnosti, prekidnih sila, prekidnog istezanja i rada do prekida se povećavaju s porastom broja slojeva.

Rezultati dobiveni ovim ispitivanjima samo su početna istraživanja prekidnih svojstava naslojenih tkanina i primjenjivosti teorijskih jednadžbi za izračunavanje inicijalnih modula elastičnosti, koja mogu pomoći u predviđanju ponašanja takvih tkanina kod rastezanja.

Literatura:

- [1] Cornelius F.D.: Movement of wood and canvas for paintings in response to high and low RH cycles, *Studies in Conservation* 12 (1967) 76-79
- [2] 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
- [3] Clulow E.E., H.M. Taylor: An experimental and theoretical investigation of biaxial stress-strain relations in a plain-weave cloth, *Journal of the Textile Institute* 54 (1963) T323-T347
- [4] Hedley G.: The stiffness of lining fabrics: theoretical and practical considerations in ICOM Committee for Conservation 6th Triennial Meeting, Ottawa (1981) 81/2/2-1-13
- [5] Peirce F. T.: The geometry of cloth structure, *Journal of the Textile Institute* 28 (1937) T45-T96
- [6] Kawabata S.: The finite-deformation theory of plain weave fabrics, Part 1: The biaxial deformation theory, *Journal of the Textile Institute* 64 (1973) 1, 137-149
- [7] Hearle J.W.S. et al.: *Structural Mechanics of Yarns and Fabrics*, Wiley-Interscience, New York (1969)
- [8] Greenwood K.: *Weaving: Control of Fabric Structure*, Merrow Technical Library, Shildon (1975)
- [9] Warren W.E.: The elastic properties of woven polymeric fabric, *Polymer Engineering Science* 30 (1990) 1309
- [10] Pan N.: Analysis of woven fabric strengths: prediction of fabric strength under uniaxial and biaxial extensions, *Composites Science and Technology* 56 (1996) 311-327
- [11] Kilby W. F.: Planar Stress-strain Relationship in Woven Fabrics, *Journal of the Textile Institute* 54 (1963) T9-T27
- [12] Masters J.E., F. Ko: Guest editorial, *Composites Science and Technology* 56 (1996) 205-207
- [13] Zweben C.: *Mechanical Behaviour and Properties of Composite Materials*, Vol.1, Technomic (1989)
- [14] Young C.R.T., R.D. Hibberd: Biaxial tensile testing of paintings on canvas, *Studies in Conservation* 44 (1999) 129-141
- [15] Russell W.H., G.A. Berger: The behaviour of canvas as a structural support for painting, *Science and Technology in the Service of Conservation*, IIC, London (1982) 139-145
- [16] Hedley G.: Relative humidity and the stress/strain response of canvas paintings: uniaxial measurements of naturally aged samples, *Studies in Conservation* 33 (1988) 133-148
- [17] Michalski S.: Paintings-their response to temperature, relative humidity, shock, and vibration. *Art in Transit.: Studies in the Transport of Paintings*, ed. M.F. Mecklenburg, National Gallery of Art, Washington (1991) 223-249.
- [18] Zheng J.: Measuring Technology of the Anisotropic Tensile Properties of Woven Fabrics, *Textile Research Journal* 78 (2008) 12, 1116-1123
- [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] Bassett R.J. et al.: Experiment Methods for Measuring Fabric Mechanical Properties: a Review and Analysis, *Textile Research Journal* 69 (1999) 11, 866-875
- [21] Penava Ž., Šimić D.: Analysis of the elastic constants of woven fabrics for at random chosen extension directions. *Tekstil* 61 (2012.) 169-179
- [22] Penava Ž. et al.: 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
- [23] Turinski Ž.: *Slikarska tehnologija, Turistička štampa*, Beograd, 1976.
- [24] Fressl I.: *Slikarska tehnologija, Radionice škole primijenjene umjetnosti*, Zagreb, 1966.
- [25] Kraigher-Hozo M.: *Slikarstvo/ Metode slikanja/ Materijali*, Svjetlost, Sarajevo, 1991., ISBN 86-01-01812-2
- [26] Penava Ž. et al.: Istraživanje utjecaja utkanja osnove i potke na Poissonov koeficijent tkanine. *Tekstil* 63 (2014.) 7-8, 217-227
- [27] 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
- [28] Penava Ž. et al.: Utjecaj anizotropije i finoće pređe na modul elastičnosti kulirnog desno-desnog pletiva, *Tekstil* 63 (2014.) 9-10, 283-292

SUMMARY**Influence of preparing painting canvas on the elastic modulus and tensile properties
at the action of tensile force***Ž. Penava, D. Šimić Penava¹, M. Tkalec*

Canvases are coated fabrics whose mechanical properties are substantially improved in comparison with the basic textile material. This work will present the experimental testing and determining of the mechanical properties of canvas. Four samples were tested under tensile force at the angles of 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90°. The fabrics were tested before the coating, as well as after one, two and three coatings. Breaking forces, elongation at break, breaking energy, elasticity module and anisotropy degree of textile coated fabrics were determined. It is demonstrated that by adding the number of applied coatings, the values of breaking forces, elongation at break, breaking energy and elasticity modules were increased, while simultaneously anisotropy coefficients were decreased. Anisotropic properties of coated fabric with multiple layers are decreased, while isotropic properties are increased. This work compares experimental and theoretical elasticity module values and their difference is reduced with the addition of coatings.

Key words: anisotropy, breaking force, elongation at break, elasticity module, painting canvas

University of Zagreb, Faculty of Textile Technology

¹*University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering*

Zagreb, Croatia

e-mail: zeljko.penava@ttf.hr

Received October 3, 2014

**Einfluss der Vorbereitung der Leinwände auf den Elastizitätsmodul und Zugfestigkeitseigenschaften
bei der Zugkrafteinwirkung**

Leinwände sind beschichtete Gewebe, deren mechanische Eigenschaften im Vergleich zu dem Textilträgermaterial deutlich verbessert sind. Die Arbeit stellt experimentelle Untersuchungen und die Ermittlung von mechanischen Eigenschaften der Leinwand dar. Vier unter den Winkeln von 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° und 90° zugeschnittene Probe­stücke in Bezug auf die Schussrichtung wurden untersucht. Gewebe wurden vor der Beschichtung und nach einer, zwei und drei Beschichtungen gemessen. Reißkraft, Reißdehnung und Zusammenziehen, Reißarbeit, Elastizitätsmodule und Anisotropiegrad von beschichteten Textilflächengebilden wurden untersucht. Es hat sich gezeigt, dass als Folge der Erhöhung der Anzahl der Schichten Reißkraft, Reißdehnung, Reißarbeit und Elastizitätsmodule erhöht werden, während die Anisotropie-Koeffizienten gleichzeitig absinken. Anisotropieeigenschaften des mit mehreren Schichten beschichteten Gewebes werden vermindert, während Isotropieeigenschaften steigen. Im Artikel werden experimentelle und theoretische Werte des Elastizitätsmoduls verglichen, und ihr Unterschied wird mit der Erhöhung der Schichtanzahl verringert