

Jaroslav Kljak, Mladen Brezović, Vladimir Jambrečić¹

Analiza interakcije strukturnih materijala kompozitnoga uslojenog drva metodom konačnih elemenata

Analysis of structural materials interaction of composite plywood by finite element method

Izvorni znanstveni rad • Original scientific paper

Prispjelo - received: 12. 11. 2003. • Prihvaćeno - accepted: 04. 02. 2004.

*UDK 630*832.285, 630*863*

SAŽETAK • *U radu su istraživane promjene relevantnih mehaničkih svojstava furnirske ploče pri statičkom opterećenju u ovisnosti o utjecaju staklenih vlakana. Primjenom različite vrste drva (bukve i topole) s obzirom na mehanička svojstva nastojao se optimizirati sustav drvo - staklena vlakna - ljepilo. Kao osnovni kriterij za optimiziranje uzeta je veličina smicajnih naprezanja i deformacija u sloju ljepila, tj. u sljubnici. Analizirana je njihova razlika pri povezivanju istovrsnih i raznovrsnih materijala odnosno sloja furnira s furnirom te furnira sa staklenim vlaknima. Radi potpunog razumijevanja unutrašnjih naprezanja u sloju ljepila, analizirana su naprezanja i u drugim slojevima furnira i kompozita. Rezultati analize naprezanja metodom konačnih elemenata pokazuju kako su naprezanja u sloju ljepila manja kod ojačane nego kod obične furnirske ploče. Najmanji apsolutni iznos naprezanja u sloju ljepila prisutan je kod kombinacije bukova furnira i staklenih vlakana a najveće relativno smanjenje naprezanja prisutno je pri kombinaciji topole sa staklenim vlaknima. Slične se zakonitosti naprezanja javljaju i u slojevima furnira i kompozita. Rezultati eksperimentalne analize čvrstoće smicanja u sloju ljepila sukladni su dobivenim rezultatima primjenom metode konačnih elemenata*

Ključne riječi: *furnirska ploča, staklena vlakna, ljepilo, kompozit, mehanička svojstva*

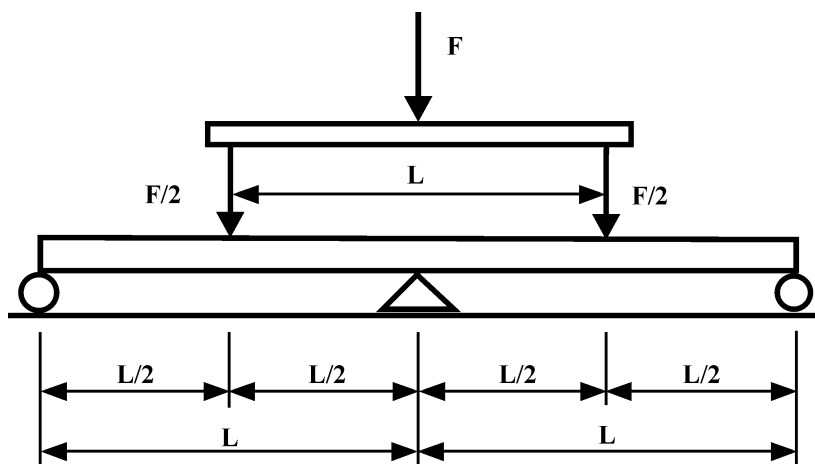
ABSTRACT • *This study deals with the investigation of changes of the relevant plywood mechanical properties, under static load, depending on the influence of glass fibres. Using different species of wood (beech and poplar), with respect to their mechanical properties, attempts were made to optimise the system: wood - glass fibre - adhesive. The values of shear stress and strain in the ply of adhesive (glueline) were taken as the basic optimisation criterion. The differences between stress values caused by bonding homogenous and heterogeneous materials were also analysed, i.e. veneer with veneer; and veneer with glass fibre.*

¹Autori su, redom, asistent i viši asistenti na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

¹The authors are assistant and assistant lectures, respectively, at the Faculty of Forestry of the Zagreb University.

Mehanička svojstva <i>Mechanical properties</i>		Bukva <i>Beech</i>	Topola <i>Poplar</i>	Kompozit <i>Composite</i>	Epoksidno ljepilo <i>Epoksy Resin</i>
Moduli elastičnosti <i>Flexural Modulus</i> (MPa)	EX	13 700	10 900	38 444	3 200
	EY	1 140	469	10 194	3 200
	EZ	2 240	1 003	10 194	3 200
Moduli smicanja <i>Shear Modulus</i> (MPa)	GXY	1 060	752	3 170	1 159
	GYZ	460	120	3 182	1 159
	GXZ	1 610	817	3 170	1 159
Poissonov broj <i>Poisson Ratio</i>	NUXY	0,51	0,752	0,371	0,38

Tablica 1.
Mehanička svojstva materijala
Table 1
Mechanical properties of materials



Slika 1.
Određivanje čvrstoće smicanja prema ASTM D 2718-00
Figure 1
Test method for shear strength according to ASTM D 2718-00

Design Environment for Composites) (Barbero, 1998). Sve navedene vrijednosti prikazane su u tablici 1.

Za izradu i analizu FEM modela primjenjen je softverski paket Cosmos M 2.6.

Model je kreiran na osnovi ASTM D 2718-00 savojne metode pomoću pet oslonaca (slika 1). Budući da se kao kontrolna ploča smatra bukova furnirska ploča, veličina sile koja djeluje na nju temelji se na dopuštenom opterećenju za bukove furnirske ploče od 1,2 MPa (Deppe i Ernst, 2000). Prilikom izrade modela između svakoga susjednog sloja kreirane su sljubnice koje su definirane svojstvima epoksidne smole, a u realnim furnirskim pločama one nastaju zbog površinskih neravnina furnira. Postavljeni su modeli kontrolnih i ojačanih troslojnih furnirskih ploča. Ojačane furnirske ploče sadrže po tri sloja staklenih vlakana u svakoj sljubnici. Ukupno su postavljena četiri modela, i to bukova kontrolna ploča (BK), topolova kontrolna ploča (TK), bukova ojačana ploča (BO) i topolova ojačana ploča (TO).

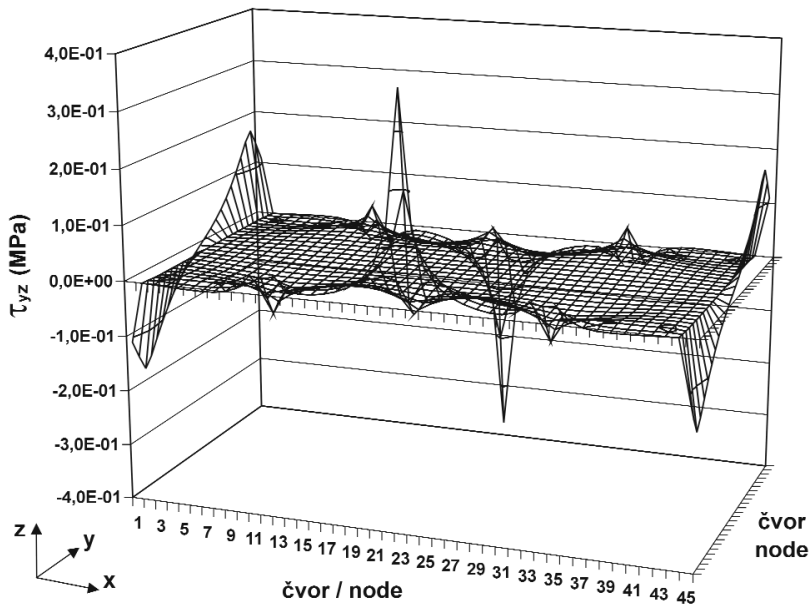
U laboratorijskom dijelu istraživanja izrađene su troslojne bukove ploče, kontrolne i ojačane istovrsnim materijalima koji su korišteni i pri postavljanju modela metode konačnih elemenata. Debljina

bukovih furnira iznosila je 1,6 mm. Od sintetičkih vlakana korištena su E-staklena vlakna, modificirana hidrosilikonskim sredstvima (I 550), vrste i težine pletiva - platno 200 g/m², proizvođača R&G GmbH Njemačka. Epoksidna smola LY 556 / HY 516 proizvođača Vantico GmbH Austrija, koristila se za izradu i kontrolnih i ojačanih ploča. Količina nanosa po jednoj sljubnici za kontrolne je ploče iznosila 220 g/m², a za ojačane ploče 530 g/m². Vrijeme i temperatura otvrdnjavanja bili su 2 h pri 50 °C + 48 h pri 20 °C, a tlak prešanja 1 MPa.

Na osnovu eksperimentalnih ploča određena je čvrstoća smicanja u sljubnici prema normama HRN EN 314 -1, - 2.

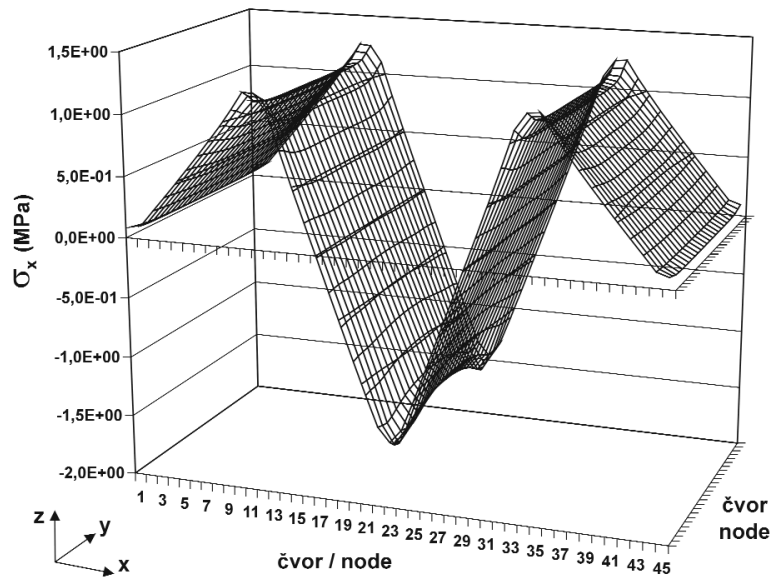
3 REZULTATI I DISKUSIJA 3 RESULTS AND DISCUSSION

Pri istraživanju smicajnih svojstava materijala osnovna teškoća proizlazi iz činjenice da se pri propisanom opterećenju ispitnih uzoraka vrlo teško mogu ostvariti samo smicajna naprezanja, jer se ona uvijek javljaju u kombinaciji s određenim iznosom normalnih naprezanja (Alfirević, 1995). Stoga je radi boljeg razumijevanja ukupnih naprezanja, tj. njihove distribucije i deformacije, nužno izvršiti analizu po pojedinim



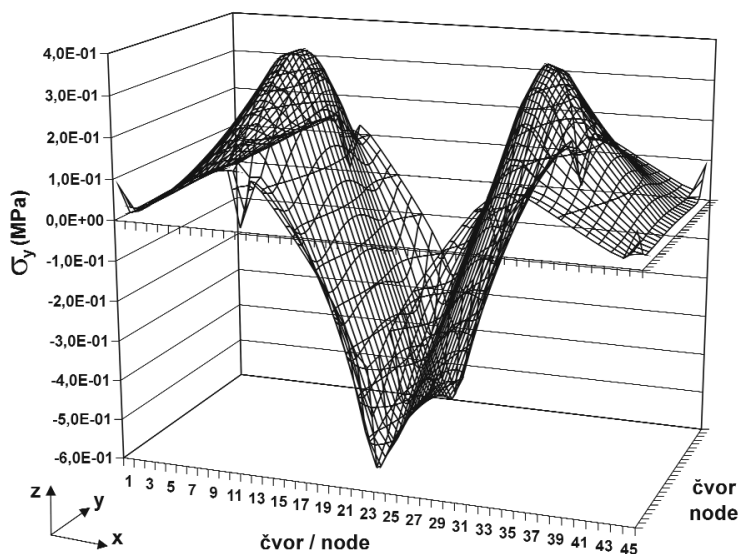
Slika 4.
Distribucija smicajnog naprezanja τ_{yz} u sloju ljepila ojačane bukove furnirske ploče

Figure 4
Distribution of shear stress τ_{yz} in a glueline of reinforced beech plywood



Slika 5.
Distribucija normalnog naprezanja σ_x u sloju ljepila ojačane bukove furnirske ploče

Figure 5
Distribution of normal stress σ_y in a glueline of reinforced beech plywood



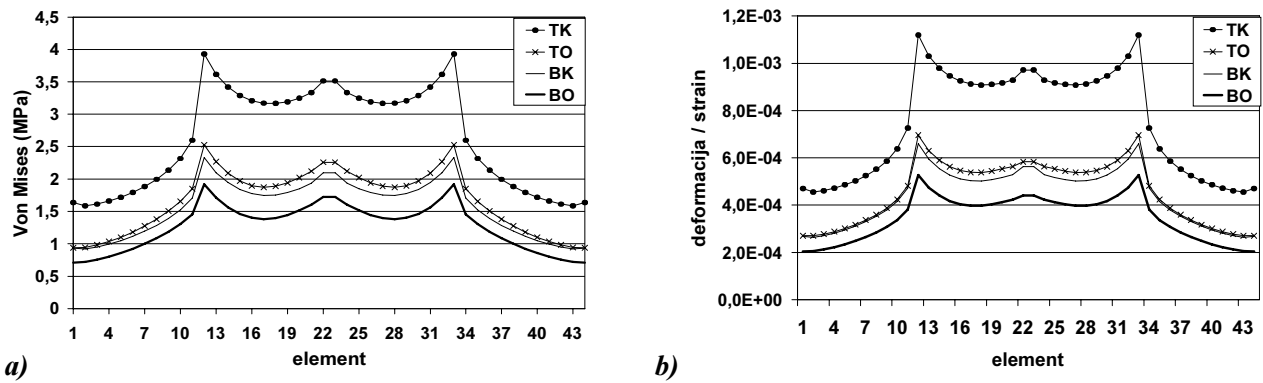
Slika 6.
Distribucija normalnog naprezanja σ_y u sloju ljepila ojačane bukove furnirske ploče

Figure 6
Distribution of normal stress σ_x in a glueline of reinforced beech plywood

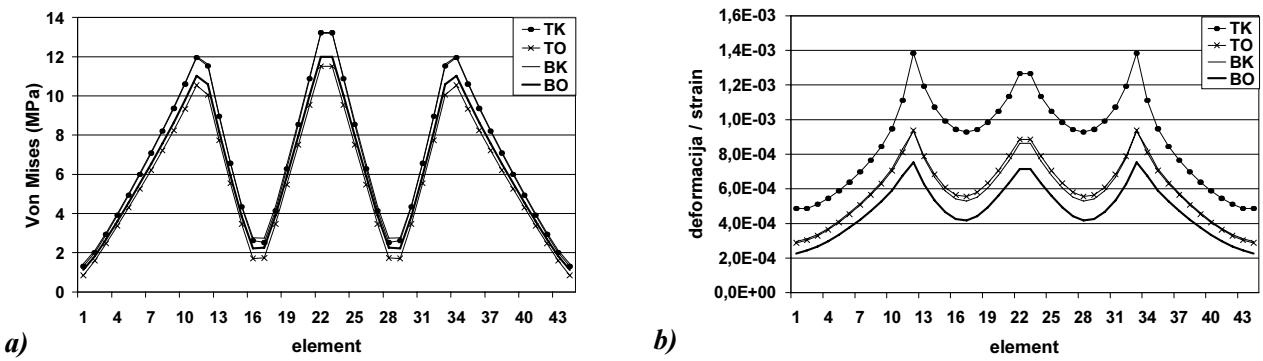
Tablica 2. Vrijednosti deskriptivne statistike za pojedine promatrane slojeve furnirskih ploča
Table 2. Values of descriptive statistic for segmented plies of veneer plywood

Broj FEM elemenata No. of FEM elements	Srednja vrijednost Mean	Medijan Median	Minimum Minimum	Maksimum Maximum	Niži kvartil Lower Quartile	Viši kvartil Upper Quartile	Varijanca Variance	Standardna devijacija Standard deviation
naprezanje u sloju ljepila (MPa) / stress in a glue line (MPa)								
TK	2,071 802	2,381 340	1,085 290	3,929 210	1,400 110	2,617 245	0,470 228	0,685 732
TO	1,364 326	1,424 165	0,632 611	2,528 740	0,983 584	1,677 775	0,188 696	0,434 392
BK	1,203 551	1,246 305	0,554 823	2,330 800	0,881 331	1,472 550	0,149 998	0,387 296
BO	1,020 581	1,042 045	0,444 496	1,918 500	0,754 331	1,241 985	0,108 069	0,328 738
deformacije u sloju ljepila / strain in a glue line								
TK	0,000 573	0,000 686	0,000 313	0,001 120	0,000 376	0,000 733	0,000 000	0,000 196
TO	0,000 364	0,000 403	0,000 182	0,000 696	0,000 252	0,000 456	0,000 000	0,000 117
BK	0,000 323	0,000 353	0,000 160	0,000 659	0,000 224	0,000 399	0,000 000	0,000 105
BO	0,000 269	0,000 286	0,000 128	0,000 527	0,000 192	0,000 330	0,000 000	0,000 085
naprezanje u sloju furnira (MPa) / stress in a ply of veneer (MPa)								
TK	5,922 778	5,623 140	0,893 612	13,223 90	3,408 575	8,536 635	9,798 820	3,130 307
TO	5,151 047	4,929 105	0,603 772	11,514 00	2,905 115	7,486 030	8,138 154	2,852 745
BK	5,891 590	5,613 985	0,892 923	13,194 80	3,412 660	8,487 840	9,642 576	3,105 250
BO	5,406 187	5,180 000	0,744 301	11,991 00	3,085 535	7,844 480	8,437 239	2,904 693
deformacije u sloju furnira / strain in a ply of veneer								
TK	0,000 686	0,000 709	0,000 314	0,001 38	0,000 501	0,000 831	0,000 000	0,000 216
TO	0,000 482	0,000 483	0,000 184	0,000 94	0,000 379	0,000 589	0,000 000	0,000 160
BK	0,000 435	0,000 427	0,000 161	0,000 93	0,000 344	0,000 533	0,000 000	0,000 150
BO	0,000 374	0,000 369	0,000 129	0,000 75	0,000 289	0,000 466	0,000 000	0,000 131
naprezanje u kompozitu (-K) i ekvivalentnom sloju furnira (-F) (MPa) / stress in a composite (-K) and equivalent veneer ply (-F) (MPa)								
TK-F	3,833 19	3,661 98	0,814 784	8,263 22	2,300 700	5,354 43	3,359 91	1,833 006
TO-K	11,503 78	11,017 65	1,934 530	25,024 50	6,756 945	16,457 35	34,774 18	5,896 963
BK-F	3,820 86	3,665 15	0,816 893	8,224 30	2,287 495	5,356 57	3,305 60	1,818 131
BO-K	9,324 20	8,911 69	1,406 020	20,575 80	5,405 700	13,483 85	24,067 03	4,905 816
deformacije u kompozitu i ekvivalentnom sloju furnira / strain in a composite and equivalent veneer ply								
TK-F	0,000 60	0,000 69	0,000 313	0,001 17	0,000 402	0,000 76	0,000 00	0,000 196
TO-K	0,000 39	0,000 41	0,000 182	0,000 75	0,000 280	0,000 48	0,000 00	0,000 122
BK-F	0,000 35	0,000 36	0,000 160	0,000 72	0,000 252	0,000 42	0,000 00	0,000 111
BO-K	0,000 29	0,000 30	0,000 128	0,000 58	0,000 217	0,000 35	0,000 00	0,000 092

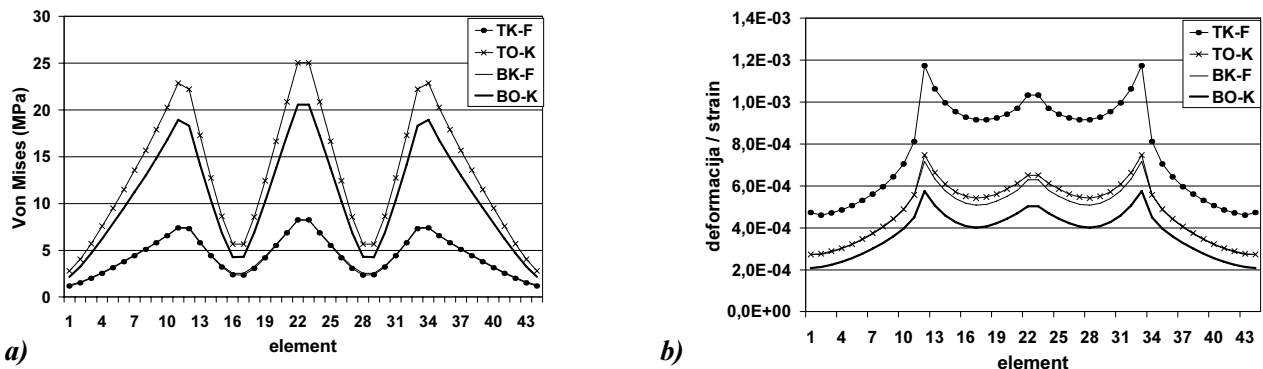
TK - topolova kontrolna furnirska ploča / control poplar plywood, TO - topolova ojačana furnirska ploča / reinforced poplar plywood, BK - bukova kontrolna furnirska ploča / control beech plywood, BO - bukova ojačana furnirska ploča / reinforced beech plywood.



Slika 9. Komparativna naprezanja s pripadajućim deformacijama u sloju ljepila pojedinih ploča
 Figure 9 Comparative stress-strain relation in a glue line of different plywoods



Slika 10. Komparativna naprezanja s pripadajućim deformacijama u sloju furnira pojedinih ploča
 Figure 10 Comparative stress-strain relation in a veneer of different plywoods



Slika 11. Komparativna naprezanja s deformacijama u sloju kompozita te u ekvivalentnom sloju furnira
 Figure 11 Comparative stress-strain relation in a composite and in equivalent veneer plies

pri čemu je srednja vrijednost za kompozitne ploče iznosila 4,4 MPa, a za kontrolne bukove ploče 3,5 MPa.

Za komparativnu analizu naprezanja u sloju furnira karakteristična su manja međusobna odstupanja vrijednosti naprezanja. Naprezanja u topolovoj kontrolnoj ploči (13,224 MPa) gotovo su identična naprezanjima u bukovoj kontrolnoj ploči (13,194 MPa), s tim da je najmanje naprezanje prisutno kod topolove ojačane ploče (11,514 MPa) (slika 10a). Za razliku od međusobnog odnosa naprezanja i deformacija koje je u slojeva ljepila bilo proporcionalno, ovdje je uočljiva različita proporcionalnost odnosa naprezanja i deformacija. To je jasno vidljivo iz vrlo velikih deformacija topolova furnira (0,00138) te znatno nižih deformacija bukova furnira (0,00093) u kontrolnim pločama, (slika 10 b). Obje su deformacije nastale pri približno jednakim naprezanjima, a njihov nesrazmjer u odnosu prema naprezanjima posljedica je različitih elastičnih svojstava materijala. Deformacije u sloju topolova furnira ojačane ploče su vrlo male (0,00094), iz čega je vidljiv utjecaj staklenih vlakana na smanjenje naprezanja i deformacija u sloju furnira. Najveće relativno smanjenje deformacija također je prisutno kod ploča izrađenih od topolova furnira, dok je najmanji apsolutni iznos deformacija prisutan kod bukove ojačane ploče (0,00075).

Radi boljeg razumijevanja utjecaja staklenih vlakana na smanjenje naprezanja i deformacija u pojedinim slojevima ploče, potrebno je usporediti veličinu naprezanja i deformacija u kompozitu s ekvivalentnim slojem furnira, tj. usporediti naprezanja kada je sloj kompozita zamijenjen slojem furnira u ploči istovrsne konstrukcije. Slika 11a) prikazuje kako pri jednakom vanjskom opterećenju sloj kompozita preuzima višestruko veća naprezanja od sloja furnira (topola 8,263 MPa, te bukva 8,224 MPa), i to veća naprezanja preuzima ako je ukomponiran u ploču s topolovim (25,024 MPa) nego u ploču s bukovim (20,575 MPa) furnirima. S druge strane najveće se deformacije javljaju u sloju drva kod topolove kontrolne furnirske ploče (0,00117), dok su deformacije u sloju drva kod bukove kontrolne ploče (0,00072) svega nešto manja nego kod sloja kompozita u topolovoj ojačanoj furnirskoj ploči (0,00075). Najmanje deformacije prisutne su u sloju kompozita bukove ojačane furnirske ploče (0,00058)(slika 11b).

4 ZAKLJUČAK

4 CONCLUSION

Na osnovi analize rezultata modela postavljenih i obrađenih metodom konačnih elemenata te analizom rezultata eksperimentalno izrađenih kontrolnih i ojačanih furnirskih ploča mogu se izvesti sljedeći zaključci.

- Inkorporacijom staklenih vlakana u sljubnicu furnirske ploče nastaju promjene u iznosu i distribuciji naprezanja kao i pripadajućih deformacija u svim slojevima furnirske ploče.
- Utjecaj staklenih vlakana očituje se u smanjenju naprezanja i deformacija prisutnih u sloju ljepila kod ojačanih ploča u odnosu na kontrolne furnirske ploče. Najveće relativno smanjenje prisutno je kod međusobnog odnosa kontrolne i ojačane topolove furnirske ploče, dok su kod bukove ojačane ploče prisutna najmanja apsolutna naprezanja i deformacije.
- Utjecaj staklenih vlakana također se očituje u smanjenju naprezanja i deformacija prisutnih u sloju furnira kod ojačanih u odnosu na kontrolne ploče. Najveći iznos relativnog smanjenja je prisutan u topolovim a najmanji apsolutni iznos u bukovim listovima furnira.
- Topolovi furniri zbog slabijih mehaničkih svojstava imaju nepovoljan odnos naprezanja i deformacija, ali je kod topolovih ojačanih ploča ujedno izražen i najveći utjecaj staklenih vlakana na poboljšanje mehaničkih svojstava furnirske ploče.

5 LITERATURA

5 REFERENCES

1. Alfrević, I., 1995: Nauka o čvrstoći I. Tehnička knjiga, Zagreb.
2. Barbero, J.E., 1998: Introduction to Composite Materials Design. Taylor & Francis, Philadelphia, Pennsylvania.
3. Brezović, M., Jambreković, V., Kljak, J., 2002: Utjecaj karbonskih vlakana na neka relevantna svojstva furnirskih ploča. Drvna industrija (53) 1: 23 - 31.
4. Deppe, H. J., Ernst, K., 2000: Taschenbuch der Spanplatten Technik. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co, Lainfelden-Echterdingen.
5. Gerrard, H., 1987: The equivalent orthotropic elastic properties of plywood. Wood Science and Technology (21)5: 335 - 348.
6. Laufenberg, T. L., Rowlands, R. E., Krueger, G. P., 1984: Economic feasibility of synthetic fiber reinforced laminated veneer lumber (LVL). Forest Product Journal (34)4: 15 - 22.
7. Rowlands, R. E., Van Deweghe, R. P., Laufenberg, T. L., Krueger, G. P., 1986:

- Fiber-reinforced wood composites. Wood and Fiber Science (18)1: 39 - 57.
8. Xu, H., Tanaka, C., Nakao, T., Joshinobu, M., Katayama, H., 1998: Evaluation of rolling shear strength of plywood by flexural vibration method. Journal of Wood Science (44): 147 - 151.
 9. Xu, H., Tanaka, C., Nakao, T., Joshinobu, M., Katayama, H., 1998: Effects of fiber length and orientation on elasticity of fiber-reinforced plywood.. Journal of Wood Science (44): 343 - 347.
 10. Xu, H., Tanaka, C., Nakao, T., Nishino, Y., Katayama, H., 1996: Flexural and Shear Properties of Fiber- Reinforced Plywood. Mokuzai Gakkaishi (42) 4: 376 - 382.
 11. *** 2000: Flüssigkunststoffe. Catalogue 6, R&G GmbH
 12. *** 1999: Wood handbook - Wood as an Engineering Material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113, Madison, WI.
 13. *** ASTM D 2718-00 Standard Test Methods for Structural Panels in Planar Shear (Rolling Shear)
 14. *** HRN EN 314 - 1 Uslojeno drvo: Kvaliteta slijepljenosti - 1. Dio: Metode ispitivanja
 15. *** HRN EN 314 -2 Uslojeno drvo: Kvaliteta slijepljenosti - 2. Dio: Zahtjevi

Corresponding address:

Mr. sc. JAROSLAV KLJAK
Department of Wood based Panels and
Chemical Wood Processing
Faculty of Forestry
University of Zagreb
Svetošimunska 25
HR-10000 ZAGREB
CROATIA
E-mail: kljak@sumfak.hr