

Jaroslav Kljak, Mladen Brezović¹

Djelovanje smicajnih komponenata na veličinu naprezanja pri vlačnom opterećenju furnirske ploče

Effect of shear components on stress values in plywood panel subjected to tensile load

Izvorni znanstveni rad · Original scientific paper

Prispjelo – received: 10. 7. 2007.

Prihvaćeno – accepted: 11. 10. 2007.

UDK: 630*832.282

SAŽETAK • U radu su analizirane pojedine komponente naprezanja koje se pojavljuju pri vlačnom opterećenju furnirske ploče. Analiza je provedena na sedmoslojnoj bukovoj furnirskoj ploči debljine 10,52 mm. Vlačno opterećenje furnirske ploče izvedeno je prema smjernicama europske norme HRN EN 789. Mjerni rezultati dobiveni empirijskim metodama mjerenja upotrijebljeni su kao osnova za postavljanje simulacijskog modela metodom konačnih elemenata (FEM).

Rezultati istraživanja pokazuju da postoji velika razlika u distribuciji naprezanja između paralelno i okomito orijentiranih listova furnira. U paralelnih slojeva najveći su iznosi σ_{vm} (Von Mises) naprezanja distribuirani po užem, tj. središnjem djelu epruvete, što je ujedno poželjna raspodjela naprezanja. Za razliku od toga, u okomitih slojeva koncentracija naprezanja nalazi se upravo na prijelazu između širega i užeg dijela, što upućuje na postojanje specifičnog problema pri određivanju vlačnih svojstava furnirske ploče.

Rezultati istraživanja također pokazuju da smicajna komponenta τ_{xy} ima znatan udio u analizi ukupnih naprezanja te da je njezin utjecaj na ukupna naprezanja znatno izraženiji u okomito orijentiranih listova furnira. Ostale dvije komponente smicajnih naprezanja, τ_{xz} i τ_{yz} , imaju praktički zanemarive iznose, što je i posve razumljivo jer se pri analizi djelovalo opterećenjem u ravnini.

Ključne riječi: furnirska ploča, vlačna svojstva, naprezanje, FEM

ABSTRACT • This paper analyses individual stress components that appear in plywood panels subjected to tensile load. The analysis was conducted on a seven-layer beech plywood panel, 10.52 mm in thickness. Tensile load was applied on the plywood panel according to the guidelines of the European Norm HRN EN 789. Measurement results obtained by empirical measurement methods were used as the basis for developing a simulation model using the finite elements method (FEM).

The study results show that there are substantial differences in the distribution of stress between the parallel- and perpendicular-oriented veneer layers. In parallel layers, the highest values of the σ_{vm} (Von Mises) stress were distributed along the narrow or central region of the test piece, which also represents the desired stress distribution. Contrary to this, in perpendicular layers, the stress distribution is concentrated at the transition between the narrow and wider areas, which indicates the presence of a significant problem in determining the tensile properties of plywood panels.

The study results also indicate that the shear component τ_{xy} accounts for a significant share of the total stress and

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

¹ The authors are senior assistant and assistant professor at the Faculty of Forestry, University of Zagreb, Croatia.

that its influence on the overall stress is significantly more pronounced in perpendicular layers. The values of the remaining two shear components τ_{xz} and τ_{yz} are virtually negligible, which is reasonable considering that the numerical model was subjected to in-plane load.

Key words: plywood panel, tensile properties, stress, FEM

1. UVOD 1 INTRODUCTION

O vlačnoj čvrstoći drva u literaturi se može pronaći relativno malo podataka. Stoga je i razumijevanje naprezanja koja nastaju zbog vlačnog opterećenja na neki način nepotpuno. Pri određivanju vlačnih svojstava masivnog drva promatrani su različiti parametri koji utječu na mjerne rezultate. Tako je na uzorcima velikih dimenzija praćen utjecaj kvrga i dužine mjernog uzorka na vlačnu čvrstoću masivnog drva. Utjecaj dužine mjernog uzorka bio je različit za piljenice više i niže klase (Takeda i Hashizume, 2000). Za razliku od toga, na malim uzorcima bez anatomskih grešaka praćen je samo utjecaj dužine vrata epruvete na veličinu vlačnih svojstava. Pri tome je ustanovljeno da dužina vrata epruvete ima određen utjecaj na mjerne rezultate (Zhu i dr., 2001).

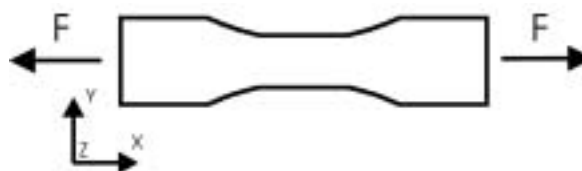
Osim određivanja vlačnih svojstava, pokušala se odrediti i čvrstoća smicanja pri vlačnom opterećenju u ovisnosti o promjeni kuta vlaknaca. No egzaktna ovisnost nije ustanovljena unatoč jednostavnosti vlačnog opterećenja (Yoshihara i Ohta, 2000). Ta činjenica upućuje na to da je vrlo teško odrediti utjecaj pojedinih komponenata naprezanja na destrukciju drva. Osim istraživanja na masivnom drvu, istraživane su i pojedine kombinacije masivnog drva i uslojenog drva (Hayashi i dr., 1992) ili pak samo uslojenog drva (Wu i Furuno, 1999). No ta su se istraživanja temeljila samo na mjerenju razlika u čvrstoći zbog različite strukturne građe, pri čemu nisu analizirana njihova unutarnja naprezanja. Stanovita analiza unutarnjih naprezanja u furniru pri vlačnom opterećenju LVL-a obavljena je metodom konačnih elemenata (Yamauchi i dr., 1997). U toj je analizi prikazano opterećenje u uzorku koji je izrađen prema JIS standardima. No ti podaci nisu izravno primjenjivi na raspodjelu naprezanja koja se pojavljuju pri određivanju vlačnih svojstava prema europskim normama zbog različitog oblika ispitne epruvete, a time i njezina opterećenja. Osim toga, analizom nije obuhvaćen utjecaj pojedinih komponenata naprezanja na raspodjelu ukupnih naprezanja. Stoga je cilj ovog rada provesti analizu naprezanja u pojedinim slojevima furnirske ploče te odrediti udio pojedinih komponenti naprezanja na veličinu i raspodjelu ukupnog naprezanja pri vlačnom opterećenju ploče u skladu sa smjericama službenih hrvatskih odnosno europskih normi.

2. MATERIJALI I METODE 2 MATERIALS AND METHODS

Relevantna svojstva furnirske ploče određena su na temelju empirijskih mjerenja te simulacijskog mo-

$$[A] = \frac{2}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \begin{bmatrix} (n_1 E_1 + n_2 E_2) & \nu_{12} E_2 (n_1 + n_2) & 0 \\ \nu_{12} E_2 (n_1 + n_2) & (n_2 E_1 + n_1 E_2) & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} (1 - \nu_{12}\nu_{21}) (n_1 + n_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

dela. Kao kontrolna je ploča poslužila sedmeroslojna bukova furnirska ploča simetrične građe s unakrsno orijentiranim listovima furnira. Debljina furnirske ploče iznosila je 10,52 mm (HRN EN 325), njezina je gustoća bila 750 kg/m³ (HRN EN 323), uz sadržaj vode od 8,8 % (HRN EN 322). Vlačna čvrstoća u smjeru dužine ploče iznosila je 53,5 N/mm², a u smjeru širine ploče 59,2 N/mm². Vlačna svojstva furnirske ploče određena su prema smjericama norme HRN EN 789 (sl. 1).



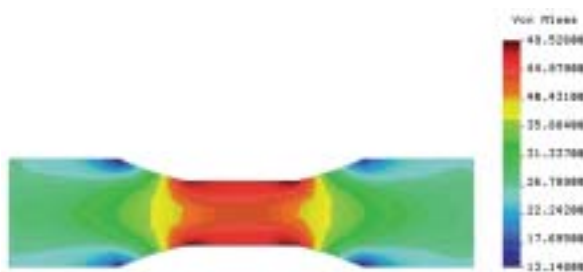
Slika 1. Vlačna ispitna epruveta i koordinatni sustav
Figure 1 Tensile test piece and coordinate system

Vrijednosti dobivene empirijskim mjerenjem služile su kao polazište za kreiranje simulacijskog modela. Za izradu i analizu modela korišten je softverski paket COSMOS/M, modul statika, linearno-elastična teorija. Svaki sloj furnira definiran je kao materijal s ortotropnim svojstvima, odnosno elastične konstante bukovine iznosile su: moduli elastičnosti $E_x = 13\,700$ N/mm², $E_y = 1\,140$ N/mm²; moduli smicanja $G_{xy} = 1\,060$ N/mm², $G_{yz} = 460$ N/mm², $G_{xz} = 1\,610$ N/mm² i Poissonovi brojevi $\nu_{xy} = 0,51$, $\nu_{yz} = 0,36$, $\nu_{xz} = 0,45$ (Dinwoodie, 1981). Pri postavljanju modela obavljena je koincidencija osi Kartezijeva koordinatnog sustava s tri glavna smjera u drvu, i to prema sljedećemu: smjerovi osi x, y i z označavaju longitudinalni, tangencijalni i radijalni smjer drva. U FEM modelu definirani su samo pojedini slojevi furnira koji su međusobno izravno spojeni, pri čemu su slojevi ljepila zanemarivo tanki te nisu utjecali na veličinu naprezanja u furniru.

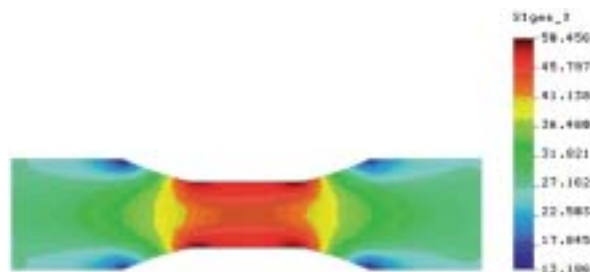
Ukupna sila koja djeluje na model iznosila je 40% vrijednosti maksimalne sile, tj. vlačne čvrstoće u smjeru dužine ploče kako bi se ostalo u području elastičnih naprezanja i deformacija koje se pojavljuju u furnirskoj ploči.

Pri ravninskom stanju naprezanja laminata s međusobno unakrsno orijentiranim slojevima može se pisati (Herakovich, 1998) (1).

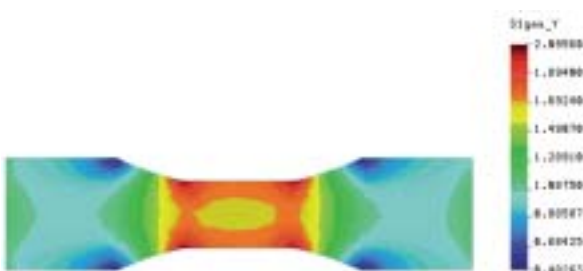
Pri tome je matrica $[A]$ matrica krutosti pri opterećenju u ravnini, t je debljina slojeva, n_1 i n_2 su brojevi slojeva čija je orijentacija pod kutom od 0° odnosno 90°, E_1 i E_2 moduli su elastičnosti, G_{12} modul smicanja te ν_{12} i ν_{21} Poissonovi brojevi.



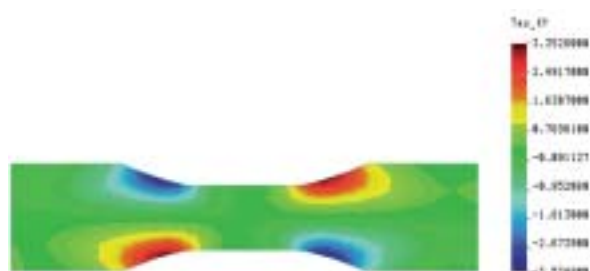
Slika 2. σ_{vm} napreznja u paralelnom sloju
Figure 2 σ_{vm} stress in parallel layer



Slika 3. σ_x napreznja u paralelnom sloju
Figure 3 σ_x stress in parallel layer



Slika 4. σ_y napreznja u paralelnom sloju
Figure 4 σ_y stress in parallel layer



Slika 5. τ_{xy} napreznja u paralelnom sloju
Figure 5 - τ_{xy} stress in parallel layer

Navedena relacija vrijedi za ravninsko stanje napreznja, odnosno za 2D napreznja, pri čemu se ostale vrijednosti smatraju zanemarivima. Ipak, u analizi metodom konačnih elemenata uzeta su u obzir i interlaminarna napreznja odnosno τ_{yz} i τ_{zx} , a zanemarena su samo normalna napreznja u radijalnom, tj. z-smjeru. Potrebno je znati vrijednosti interlaminarnih napreznja pri vlačnom napreznju kako bi se mogle usporediti s istovrsnim napreznjima pri opterećenju furnirske ploče na savijanje.

3. REZULTATI I DISKUSIJA 3 RESULTS AND DISCUSSION

Nakon što su empirijski određena svojstva furnirske ploče, čije su vrijednosti služile kao osnova za postavljanje simulacijskog modela, analizirana su napreznja furnirske ploče metodom konačnih elemenata. Raspodjela σ_{vm} (Von Mises) napreznja pri vlačnom opterećenju furnirske ploče prikazana je na slici 2.

Slika 2. prikazuje napreznja u sloju furnirske ploče čiji je smjer vlakana paralelan sa smjerom djelovanja sile. Vidljivo je da se najveće vrijednosti napreznja pojavljuju upravo na rubovima središnjega tj.

užeg dijela, ali i na prijelazima iz širega prema užem dijelu uzorka, tj. na radijusima zakrivljenosti. To su područja koncentracije napreznja koja ponajprije nastaju kao posljedica specifičnosti izrade ispitnog uzorka. Takav oblik raspodjele napreznja na paralelno orijentiranom listu furnira ponajprije je posljedica normalnih napreznja u smjeru x, koja su ujedno i dominantna po iznosima (sl. 3). Najveći iznosi nastaju pri normalnim napreznjima ($\sigma_{x maks.} = 50,5 \text{ N/mm}^2$) jer i vlačna sila djeluje upravo u tom smjeru, a to je ujedno i longitudinalni smjer drva (samo u paralelno orijentiranih slojeva), u kojemu drvo ima najveću vlačnu čvrstoću. Normalna napreznja u smjeru y znatno su nižih vrijednosti ($\sigma_{y maks.} = 2,1 \text{ N/mm}^2$) jer u tom smjeru ne djeluje nikakvo izravno opterećenje (sl. 4).

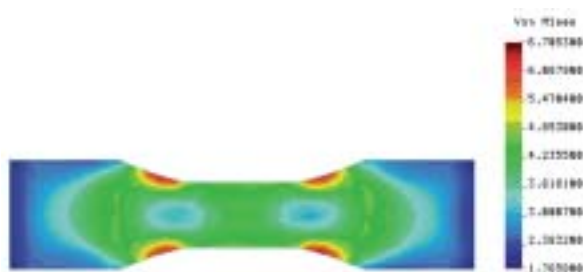
Od smicajnih napreznja dominantnu vrijednost ima komponenta τ_{xy} (maks. $3,5 \text{ N/mm}^2$), i to upravo u području prijelaza sa širega na užu dio epruvete (sl. 5). Iako se pri određivanju vlačnih svojstava uvijek nastoje minimizirati smicajna napreznja, pri opterećivanju furnirske ploče ona ipak imaju značajan utjecaj jer je modul smicanja bukovine G_{xy} gotovo 13 puta niži od modula elastičnosti E_x .

Za razliku od τ_{xy} , smicajna, tj. interlaminarna napreznja τ_{xz} i τ_{yz} imaju gotovo zanemarive iznose (tabl. 1).

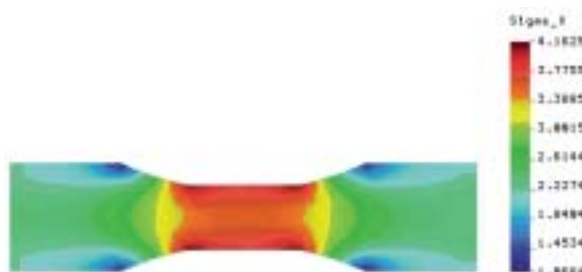
Tablica 1. Maksimalne apsolutne vrijednosti napreznja u furnirskoj ploči
Table 1 Maximum absolute stress values in the plywood panel

σ_{vm} N/mm ²	σ_x N/mm ²	σ_y N/mm ²	τ_{xy} N/mm ²	τ_{xz} N/mm ²	τ_{yz} N/mm ²
paralelni sloj – parallel layer					
49,526	50,456	2,096	3,535	9,118e-017	2,470e-017
okomiti sloj – perpendicular layer					
6,705	4,163	2,571	3,535	2,597e-017	8,673e-017

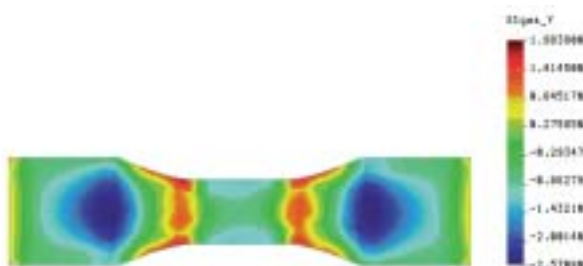
σ_{vm} - Von Misesovo napreznja; σ_x, σ_y normalna napreznja u smjeru x i y; $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ - smicajna napreznja u smjerovima xy, xz i yz.
 σ_{vm} - Von Mises stress; σ_x, σ_y normal stress in x and y directions; $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ - shear stress in xy, xz and yz directions.



Slika 6. σ_{vm} naprezanje u okomitom sloju
Figure 6 σ_{vm} stress in perpendicular layer



Slika 7. σ_x naprezanje u okomitom sloju
Figure 7 σ_x stress in perpendicular layer



Slika 8. σ_y naprezanje u okomitom sloju
Figure 8 σ_y stress in perpendicular layer



Slika 9. τ_{xy} naprezanje u okomitom sloju
Figure 9 τ_{xy} stress in perpendicular layer

Ako se te vrijednosti usporede s vrijednostima prijašnjih istraživanja (Kljak i dr., 2006), vidljiva je razlika u iznosima interlaminarnih naprezanja između savojnoga i vlačnog opterećenja furnirske ploče, pri čemu su interlaminarna naprezanja pri savojnom opterećenju višestruko veća. Stoga se može reći da interlaminarna smicajna naprezanja praktički nemaju utjecaja na pojavu ukupnih naprezanja pri određivanju vlačnih svojstava furnirske ploče. Za razliku od njih, smicajna komponenta τ_{xy} ima vrlo velik udio, te se područje njezina djelovanja djelomično podudara s područjem djelovanja normalnih naprezanja σ_x , a također i σ_y . To je područje upravo na samom prijelazu krivulje u središnji, uži dio.

Ipak, promatranjem σ_{vm} naprezanja, s dosta se velikom sigurnošću može očekivati da će destrukcija nastati u središnjemu, užem dijelu, pri čemu se može smatrati da je samo onda kada lom nastane u samoj sredini uzorka utjecaj smicajne komponente τ_{xy} praktički jednak nuli. Sa svakim pomicanjem mjesta loma prema krajevima vrata epruvete (prema lukovima kružnice) nastaje i stanoviti porast udjela smicajnog naprezanja. Takva raspodjela naprezanja postoji u simulacijskom, tj. idealno oblikovanom uzorku, no u stvarnim će uvjetima i najmanje odstupanje od idealnog modela rezultirati još većim stvaranjem koncentracije naprezanja te većim udjelom smicajne komponente. Dodatni se problem može pojaviti i zbog nehomogene građe drva odnosno furnira.

Vrlo velik problem lociranja područja početka destrukcije, kao i određivanja utjecaja smicajne komponente, vidljiv je u onim slojevima furnirske ploče čiji je smjer vlakana okomit na smjer djelovanja sile. U okomitom sloju najveća su naprezanja komponente σ_x distribuirana po središnjem dijelu (sl. 7) i gotovo su identičnog izgleda kao i u paralelnom sloju, ali s izrazito nižim naprezanjem ($50,5 \text{ N/mm}^2$ - paralelno, te $4,2 \text{ N/mm}^2$ - okomito). No velika razlika u distribuciji na-

prezanja pojavljuje se za komponentu σ_y , čije najveće vrijednosti nastaju upravo na lukovima kružnice (sl. 8), pri čemu postoji i stanoviti porast naprezanja ($2,1 \text{ N/mm}^2$ - paralelno, na $2,6 \text{ N/mm}^2$ - okomito). Smicajna komponenta τ_{xy} u okomitom sloju zadržava gotovo identične iznose i raspodjelu kao i u paralelnom sloju (zbog uvjeta simetrije ortotropnih materijala $\tau_{xy} = \tau_{yx}$). Sve te promjene u naprezanjima dovode i do promjene distribucije σ_{vm} naprezanja, pri čemu se najveće vrijednosti pojavljuju upravo na područjima radijusa zakrivljenosti ($\sigma_{vm \text{ maks.}} = 6,7 \text{ N/mm}^2$) te znatno padaju prema središnjem dijelu (sl. 6).

Usporedimo li vrijednosti σ_{vm} naprezanja s vrijednostima vlačne čvrstoće za bukvinu, pri čemu je $\sigma_{\parallel} = 135 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{\perp} = 10 \text{ N/mm}^2$ (Wagenführ, 1974), tada možemo primijetiti da je omjer vlačne čvrstoće i naprezanja σ_{vm} veći za paralelno ($\sigma_{\parallel} / \sigma_{vm\parallel}$), a manji za okomito ($\sigma_{\perp} / \sigma_{vm\perp}$) orijentirane listova furnira. Iz toga bi se moglo pretpostaviti da su okomito orijentirani listovi kritični pri određivanju vlačne čvrstoće furnirske ploče. Gdje će uistinu nastati prvi lom, moglo bi se samo predviđati primjenom pojedinih teorija loma bilo da se kao kriteriji primjenjuju maksimalna naprezanja ili najveće deformacije.

Bilo kako bilo, efekt stvaranja izražene koncentracije naprezanja u okomito orijentiranim slojevima ne bi postojao u ploča s monolitnom i homogenom strukturom. Zbog toga su područja prijelaza sa širega na užu dio vrlo kritična za furnirske ploče, pri čemu smicajna komponenta τ_{xy} ima važno mjesto u analiziranju naprezanja koja se pojavljuju pri određivanju vlačnih svojstava.

4. ZAKLJUČAK 4 CONCLUSION

U radu je provedena 2D analiza naprezanja višeslojne furnirske ploče metodom konačnih elemen-

ta. Svi su listovi furnira definirani prema elastičnim konstantama bukovine. Na temelju rezultata provedenih istraživanja udjela smicajnih komponenata naprežanja pri vlačnom opterećenju furnirske ploče može se zaključiti da smicajna komponenta τ_{xy} ima znatan udio u analizi ukupnih naprežanja. Njezina veličina i iznos naprežanja ostaju praktički nepromijenjeni bilo da se promatraju slojevi u kojima je smjer vlakanca paralelan sa smjerom djelovanja sile ili da su oni okomito orijentirani. Bez obzira na jednak iznos naprežanja, njezin je utjecaj na ukupna naprežanja znatno veći u okomito orijentiranih slojevima, kako zbog specifične anatomske građe drva, tj. furnira, tako i zbog činjenice da su ostale komponente naprežanja u okomitom sloju znatno manjih iznosa, čime se automatski povećava njezin značaj odnosno udio u ukupnim naprežanjima. Ostale dvije komponente smicajnih naprežanja, τ_{xz} i τ_{yz} , praktički su zanemarivih veličina, što je i posve razumljivo jer se pri analizi djelovalo opterećenjem u ravnini. Najveća promjena u iznosu normalnih naprežanja pojavljuje se za komponentu σ_x (zbog unakrsne orijentacije listova furnira), što je također jedan od glavnih uzroka da se najveća σ_{vm} naprežanja pojavljuju na radijusima zakrivljenosti, i to samo u okomito orijentiranim listovima furnira, a ne u užem središnjem dijelu, kao u paralelno orijentiranim listovima furnira.

Takve različite raspodjele koncentracija naprežanja u pojedinim slojevima furnirske ploče nedvojbeno upućuju na potrebu razumijevanja specifičnih promjena koje nastaju u furnirskoj ploči kao posljedica njezine strukturne građe.

5. LITERATURA 5 REFERENCES

- Dinwoodie, M. J., 1981: Timber its nature and behaviour. Van Nostrand Reinhold Co. Ltd.
- Hayashi, T.; Miyatake, A.; Hoshi, T., 1992: Strength Properties of Sugi composite-glulam Beams II. Bending and tensile strengths of composite-glulams consisting of low-grade finger-jointed sugi laminae and laminated veneer lumber. *Mokuzai-Gakkaishi* 38 (3):247-255.
- Herakovich, T. C., 1998: Mechanics of Fibrous Composites. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Kljak, J.; Brezović, M.; Jambrečković, V., 2006: Plywood stress optimisation using the finite element method. *Wood Research* 51 (1):1-10.
- Takeda, T.; Hashizume, T., 2000: Differences of tensile strength distributions between mechanically high-grade and low-grade Japanese larch lumber III: effect of knot restriction on the strength of lumber. *J. Wood Sci.* 46 (2):95-101.
- Wagenführ, R.; Scheiber, C., 1974: *Holzatlas*. VEB Fachbuchverlag: Leipzig, p 333.
- Wu Z., H.; Furuno, T., 1999: Stress distributions and failure types of curved laminated veneer lumber for use in furniture under loading. *J. Wood Sci.* 45 (2):134-142.
- Yamauchi, H.; Shoho, S.; Ping, Y.; Kawai, S.; Sasaki, H., 1997: Manufacture of cylindrical LVL by spiral-winding Method I. Effects of interlocked-ply on the tensile Young's modulus. *Mokuzai-Gakkaishi* 43 (9):747-753.
- Yoshihara, H.; Ohta, M., 2000: Estimation of the shear strength of wood by uniaxial-tension test of off-axis specimens. *J. Wood Sci.* 46 (2):159-163.
- Zhu, J.; Kudo, A.; Takeda, T.; Tokumoto, M., 2001: Methods to estimate the length effect on tensile strength parallel to the grain in Japanese larch. *J. Wood Sci.* 47 (4):269-274.
- *** 1993: HRN EN 322 Wood-based panels - Determination of moisture content. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, B.
- *** 1993: HRN EN 323 Wood-based panels - Determination of density. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, B.
- *** 1993: HRN EN 325 Wood-based panels - Determination of dimensions of test pieces. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, B.
- *** 1995: HRN EN 789 Timber structure - Determination of mechanical properties of wood based panels. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, B.

Corresponding address:

Assistant JAROSLAV KLJAK, PhD

Department for Material Technologies
University of Zagreb, Faculty of Forestry
Svetošimunska cesta 25, P.O. Box 422
10002 Zagreb, Croatia
e-mail: kljak@sumfak.hr