

Naponsko stanje presjeka drva u završnoj fazi sušenja

STATE OF STRESSES ON CROSS SECTION OF TIMBER IN FINAL STAGE OF DRYING

Mr. **Izet Horman**, dipl. ing.
Mr. **Jadranko Jahić**, dipl. ing.
Mašinski fakultet Sarajevo

Prispjelo: 3. srpnja 1991.
Prihvaćeno: 5. studenog 1991.

UDK 630*847

Izvorni znanstveni rad

Sažetak

U radu su predstavljeni rezultati proračuna unutarnjih napona koji su nastali po presjeku drva u završnoj fazi sušenja bukovih obradaka presjeka 60×60 mm. Za proračun je primijenjena modificirana JOUNG NORRISOV-a metoda.

Kako se iz samih rezultata vidi, radi se o dosta blagom režimu sušenja koji nije bitno narušio osnovne kriterije kvalitete sušenja.

Ključne riječi: sušenje drva — unutarnji naponi — bukva.

Summary

In this article given are results of calculation of internal stresses appearing on cross section of timber in final stage of drying.

From these results we can see that current schedule of wood drying is mild and that it has not disturbed essential criteria of quality lumber drying.

Key words: Timber drying — internal stresses — beech.

UVOD

INTRODUCTION

Zapreminu tijela čine odvojeni sistemi materijalnih točaka (molekula), koji su povezani unutarnjim (međumolekularnim) silama. Deformacijom tijela dolazi do promjene međumolekularnih razmaka i pojave unutarnjih sila koje teže uspostavljanju prvobitnog rasporeda molekula. Kako se radi o djelovanju tih sila po jedinici površine, u tom kontekstu može se govoriti o pojavi unutarnjih napona. Budući da je poznato da drvo prilikom sušenja ispod određenog sadržaja vode mijenja svoju zapreminu, gornja teorija navodi na zaključak da prilikom tog procesa dolazi do pojave unutarnjih napona.

NEKI ASPEKTI TEHNOLOGIJE SUŠENJA DRVA

SOME ASPECTS OF THE TECHNOLOGY OF WOOD DRYING

S obzirom da je u ovom radu kao materijal istraživanja tretirano drvo, kao higroskopan i anizotropan materijal, kao pretpostavka za lakše razumijevanje problema potrebno je podsjetiti na neke aspekte tehnologije sušenja drva.

1) Cilj sušenja drva je odstranjivanje vode uz što manje promjene strukture, oblika i dimenzija materijala koji se suši.

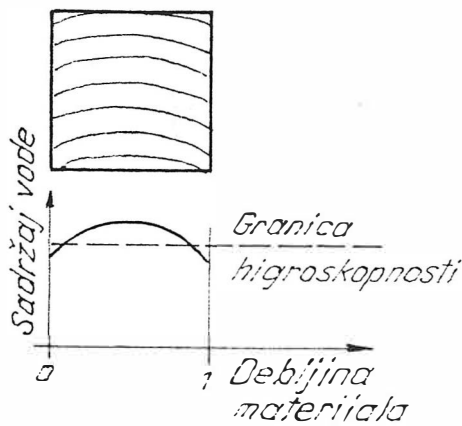
Umjetnim sušenjem nastoji se ubrzati ovaj proces, odnosno odstraniti ona količina vode koju nije moguće efikasno odstraniti prirodnim putem.

2) Promjena sadržaja vode u drvu u hidroskopskom području praćena je promjenom dimenzija materijala.

Budući da drvo sušenjem gubi vodu prvo s površine pa potom iz unutrašnjosti, u toku procesa prisutna je pojava profila vlage po presjeku materijala koji se suši (sl. 1).

Prema tome za početak sušenja karakterističan je niži sadržaj vode u vanjskom dijelu drva koji je vrlo često ispod granice higroskopnosti, dok je sadržaj vode u unutarnjem dijelu znatno iznad te granice.

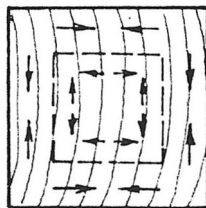
Gubitak vode iz vanjskog dijela drva ispod granice higroskopnosti uzrokuje smanjenje zapremine, odnosno utezanje tog dijela drva, pa čak i deformaciju presjeka. Istovremeno sadržaj vode u unutrašnjosti znatno je iznad granice higroskopnosti, zbog čega ovaj dio drva nema tendenciju promjene (smanjenja) dimenzija, te prema tome ima ulogu sprečavanja odnosno nastoji da



Slika 1.
Fig. 1.

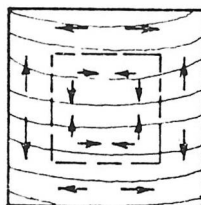
se odupre težnji vanjskog dijela drva za promjenom dimenzija.

Rezultat ovog međusobnog djelovanja je pojava napona zatezanja u vanjskom dijelu i kao reakcija njima, pojava napona pritiska u unutarnjem dijelu drva (sl. 2). Ove promjene karakteristične su za prvu, odnosno početnu fazu sušenja drva.



Slika 2.
Fig. 2.

Drugu ili završnu fazu sušenja karakterizira pad sadržaja vode u unutarnjem dijelu drva ispod granice higroskopnosti, što s obzirom na već nastale plastične deformacije vanjskog dijela drva ima za posljedicu nastanak napona zatezanja u unutarnjem dijelu i suprotno njima pojavu napona pritiska u vanjskom dijelu drva (sl. 3).



Slika 3.
Fig. 3.

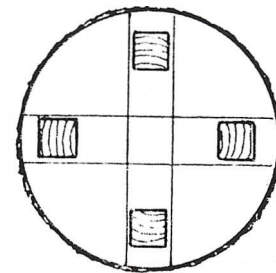
Kada se ima u vidu sve naprijed navedeno, očigledno je da samo sušenje drva nije tako jednostavan i beznačajan problem, te da bi se proces sušenja kvalitetno doveo do kraja, treba nastojati da unutarnji naponi koji se javljaju u drvu za vrijeme sušenja ne prekorače granicu čvrstoće materijala.

Prema tome, zadatak istraživanja koncipiran je tako da se istraži odnosno eksperimentalno potvrdi profil raspodjele unutarnjih napona po presjeku drva u završnoj fazi sušenja, odnosno u fazi nakon izmjene smjera djelovanja unutarnjih napona.

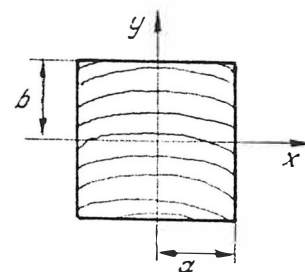
MATERIJAL I METODE

MATERIALS AND METHODS

Kao materijal istraživanja poslužili su bukovi obratci presjeka 60×60 mm. Položaj obradaka u trupcu bio je takav da je nakon izrezivanja na presjeku dobivena čista radialno-tangentna ravnina tj. tangenta na godove paralelna je s dvije suprotne strane presjeka (sl. 4).



Slika 4.
Fig. 4.



Slika 5.
Fig. 5.

Ispitivanju je podvrgnuto 10 obradaka. Kontrola vlažnosti spomenutih obradaka pratila se gravimetrijskom metodom. Sušenje se provodilo u jednokolosječnoj komori s FOXBORO poluautomatikom.

U svijetu je poznato nekoliko metoda za proračun unutarnjih napona koji se javljaju po presjeku drva za vrijeme sušenja, međutim moglo bi se reći da su metode UGOLJEVA, McMILLENA i JOUNG NORRISA postale veoma česte u praksi istraživača.

Na ovom mjestu ukratko će biti izložen proračun unutarnjih napona izvršen modificiranom JOUNG NORRISOVOM metodom. Uz osnovne postavke teorije elastičnosti rješavanje problema ovom metodom svodi se na rješavanje diferencijalnih jednačbi ravnoteže (1) uz zadovoljenje konturnih uvjeta i jednačbe kompatibilnosti (2).

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial Y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial X} = 0$$

Konturni uvjeti

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 0 \text{ za } X = \pm a \\ \sigma_y &= 0 \text{ za } Y = \pm b \\ \tau_{xy} &= 0 \text{ za } X = \pm a, Y = \pm b \end{aligned}$$

Jednadžba kompatibilnosti

$$\frac{\partial^2 e_x}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 e_y}{\partial X^2} = \frac{\partial^2 e_{xy}}{\partial X \partial Y} \quad (2)$$

gdje je:

$\sigma(\tau)$ — normalni (smičući) napon
 e_x, e_y, e_{xy} — linearna (ugaona) deformacija
 a, b — dimenzije na poprečnom presjeku
 X, Y — koordinate točke za koju se traže naponi

Parcijalne diferencijalne jednadžbe mogu se riješiti na više načina, međutim uobičajena metoda za rješavanje jednadžbi ovog tipa sastoji se u uvođenju u ove jednadžbe funkcija napona ili *Airyeve funkcije* $\Phi(X, Y)$.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} \\ \sigma_y &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} \\ \tau_{xy} &= - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X \partial Y} \end{aligned} \quad (3)$$

Funkcija koja daje zadovoljavajući prikaz raspodjele napona po presjeku drva ima oblik

$$\begin{aligned} \Phi &= \left[1 - \left(\frac{X}{a}\right)^2\right]^2 \left[1 - \left(\frac{Y}{b}\right)^2\right]^2 \\ &\cdot \left[A_1 + A_2 \left(\frac{X}{a}\right)^2 + A_3 \left(\frac{Y}{b}\right)^2 + A_4 \left(\frac{X}{a}\right)^4 + A_5 \left(\frac{Y}{b}\right)^4\right] \quad (4) \end{aligned}$$

gdje su $A(i)$, $i = 1, 5$ nepoznate konstante čijim se rješavanjem definira cjelokupan problem.

Za definiranje konstanti potrebno je formirati sistem od pet jednadžbi.

Uvođenjem funkcije $\Phi(X, Y)$ u izraze za komponente deformacije i primjenom MAXWELLOVE relacije (5).

$$\frac{E_x}{\mu_x} = \frac{E_y}{\mu_y} \quad (5)$$

prema Hookeu dobivamo

$$\begin{aligned} e_x &= \frac{1}{E_x} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} - \mu_x \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} \right) \\ e_y &= \frac{1}{E_x} \left(\frac{E_x}{E_y} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} - \mu_x \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} \right) \quad (6) \end{aligned}$$

$$e_{xy} = - \frac{1}{E_x} \frac{E_x}{E_{xy}} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X \partial Y}$$

gdje je:

μ — POISSONOV koeficijent (za drvo bukve i tang. pravac $\mu_x = 0.36$)

$E(w, t)$ — funkcija modula elastičnosti

w — vlažnost drva

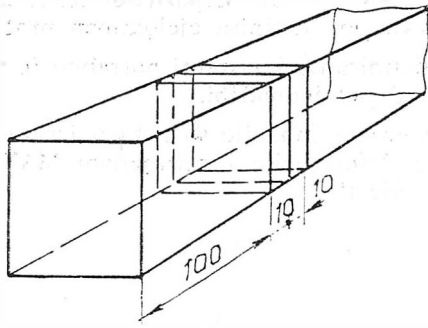
t — temperatura drva

Integriranjem jednadžbi (6) dolazimo do izraza za pomicanja točaka konture presjeka u tangencijalnom (X), odnosno radijalnom (Y) pravcu.

$$\Delta X = \int_{-a}^{+a} \frac{1}{E_x} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} - \mu_x \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} \right) dX \quad (7)$$

$$\Delta Y = \int_{-b}^{+b} \frac{1}{E_x} \left(\frac{E_x}{E_y} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} - \mu_x \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} \right) dY$$

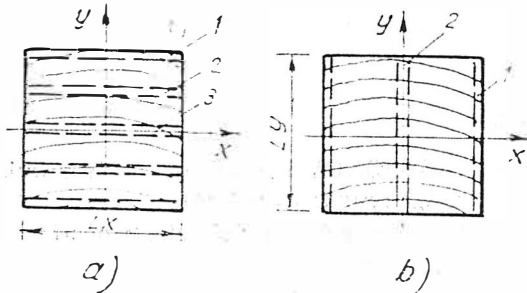
Da bi se dobio željeni sistem linearnih jednadžbi na razmaku od 100 mm od čela svakog obratka, izrezana su po dva presjeka debljine 10 mm (sl. 6). Iz jednog presjeka isjecane su la-



Slika 6.
Fig. 6.

mele u tangencijalnom pravcu, dok su iz drugog lamele isjecane u radijalnom pravcu (sl. 7).

Za formiranje sistema linearnih jednažbi dovoljno je bilo isjeći ukupno 5 lamela iz dva presjeka. Međutim, zbog mogućeg nesimetričnog rasporeda napona po presjeku obradaka, opredijelili smo se za minimalni broj lamela koji pokriva cijeli presjek, a koji uzima u obzir pomicanja konture presjeka i u pravcu radijusa i u pravcu tangente goda. Za proračun u obzir je uziman onaj kvadrant koordinatnog sistema koji daje očekivane maksimalne vrijednosti napona.



Slika 7.
Fig. 7.

Na taj način unoseći izmjerene i proračunane vrijednosti u izraze (7), formiran je sistem od pet linearnih jednažbi (8).

$$\begin{aligned} k_{11} A_1 + k_{12} A_2 + k_{13} A_3 + k_{14} A_4 + k_{15} A_5 &= \Delta X_1 \\ k_{21} A_1 + k_{22} A_2 + k_{23} A_3 + k_{24} A_4 + k_{25} A_5 &= \Delta X_2 \\ k_{31} A_1 + k_{32} A_2 + k_{33} A_3 + k_{34} A_4 + k_{35} A_5 &= \Delta X_3 \\ k_{41} A_1 + k_{42} A_2 + k_{43} A_3 + k_{44} A_4 + k_{45} A_5 &= \Delta Y_1 \\ k_{51} A_1 + k_{52} A_2 + k_{53} A_3 + k_{54} A_4 + k_{55} A_5 &= \Delta Y_2 \end{aligned} \quad (8)$$

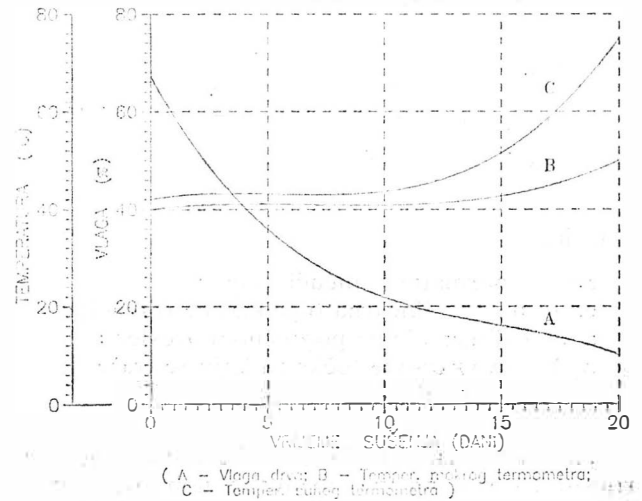
gdje je $k_{ij} = f(E)$, $i=j=1,5$

REZULTATI ISTRAŽIVANJA RESULTS OF INVESTIGATION

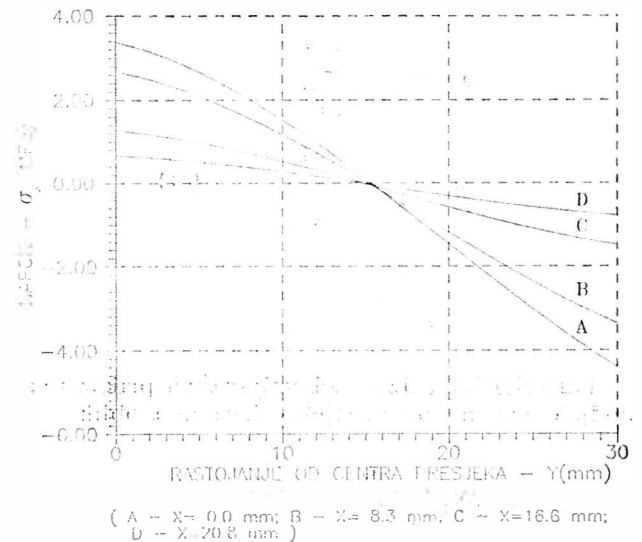
Dijagram toka sušenja, odnosno uvjeti kojima su obratci izloženi tokom sušenja, predstavljeni su na slici 8. Ispitivanje se provodilo kod prosječne vlažnosti drva od 12,06%.

Profil raspodjele normalnih napona po presjeku obradaka dan je na slikama 9. i 10. Maksimalne vrijednosti komponentnih napona predstavljaju glavne napone budući da je pravac njihova djelovanja kolinearano s pravcima glavnih osi, odnosno osi usmjerenih u pravcima tangente, odnosno radijusa goda.

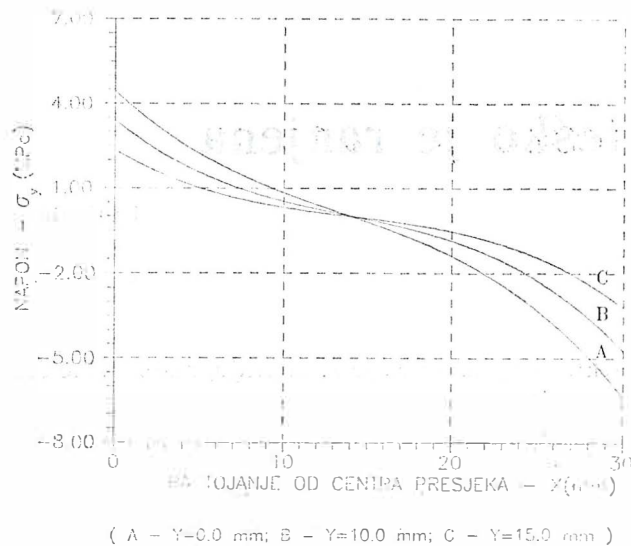
Slika 11. predstavlja raspodjelu smičućih napona po presjeku obradaka u momentu ispitivanja.



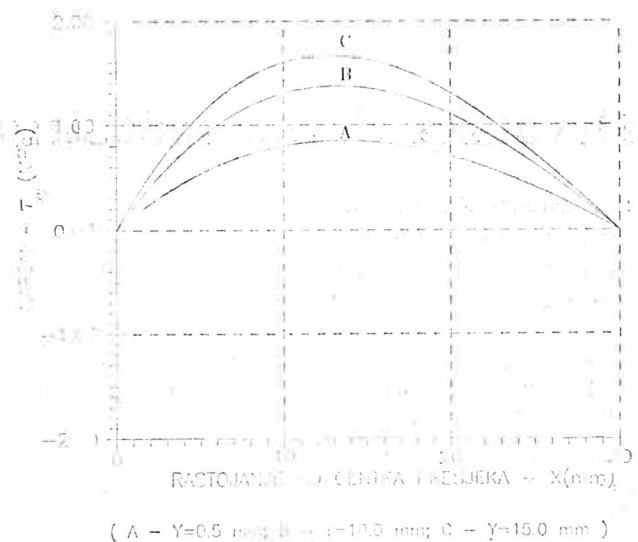
Slika 8. Tok sušenja bukavih obradaka presjeka 60 × 60 mm
Fig. 8. Drying time of beech dimension stocks 60 × 60 mm



Slika 9. Dijagram normalnih napona
Fig. 9. Distribution of normal stresses



Slika 10. Dijagram normalnih napona
Fig. 10. Distribution of normal stresses



Slika 11. Dijagram smičućih napona
Fig. 11. Distribution of shear stresses

ZAKLJUČCI CONCLUSIONS

Na osnovi rezultata istraživanja mogući su sljedeći zaključci:

— Kao što se i očekivalo od samih rezultata istraživanja, u završnoj fazi sušenja vanjski dio drva napregnut je na pritisak dok je unutarnji dio napregnut na zatezanje.

— Normalni naponi nisu prekoračili granične vrijednosti čvrstoće materijala, te prema tome nije došlo do narušavanja strukture materijala, odnosno pojave unutarnjih pukotina.

— Intenzitet smičućih napona prelazi granicu elastičnosti materijala, što je uzrokovalo neznatnu deformaciju oblika poprečnog presjeka obradaka, čija manifestacija se ogleda u formiranju konveksiteta na stranicama presjeka

$$(LX_3 > LX_2 > LX_1, LY_2 > LY_1).$$

Razlog za ovako neuobičajeno malu deformaciju oblika presjeka obradaka za vrijeme sušenja postoji u izboru za materijal ispitivanja tzv. obradaka pravilnih presjeka.

— Na kraju treba istaknuti da su se autori u ovom radu opredijelili za JOUNG NORRISOVU

metodu proračuna unutarnjih napona, videći prednosti ove metode nad ostalim kako u pogledu cjelovitosti problema tako i u pogledu zadovoljenja osnovnih postavki teorije elastičnosti materijala.

LITERATURA REFERENCES

- [1] Horman, I.: Raspodjela naprezanja po presjeku drva u početnoj fazi sušenja. Drvna industrija 11–12, str. 237–240, (1989).
- [2] Ilić, M.: Upotreba različitih metoda mjerenja unutrašnjih naprezanja koja se javljaju u drvetu u toku sušenja. Pregled 1–2, str. 1–8, (1977).
- [3] Kollmann, F., Cote, W.: Principles of Wood Science and Technology I. Berlin, Heidelberg, New York, 1968.
- [4] McMillen, J. M. and Youngs, R. L.: Stresses in Drying Lumber. Forest Products Laboratory, Report No 2513, December 1960.
- [5] McMillen, J. M. and Youngs, R. L.: Stresses in Drying Lumber. Forest Products Laboratory, Report No. 1652, December 1958.
- [6] Misilo, P.: Uticaj temperature i vlage drveta na veličinu modula elastičnosti i granica čvrstoće u vlaku i tlaku za sva tri anatomska pravca. Doktorska disertacija. Sarajevo, 1977.
- [7] Ugoļjev, B. N.: Deformativnost drevesiny i naprjaženija pri suške. Moskva, 1971.
- [8] Youngs, R. L. and Norris, C. B.: A method of Calculating Internal Stresses in Drying Wood. U. S. Forest Products Laboratory, Report No. 2133, October, 1958.
- [9] Welling, J.: Die Erfassung von Trocknungsspannungen während der Kammertrocknung von Schnittholz. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades am Fachbereich Biologie der Universität Hamburg, 1987.

Recenzent: prof. dr. Zdenko Pavlin