

Murčo Obućina, Ejub Džaferović¹, Jože Resnik²

Viskoelastična svojstva drva pri promjeni sadržaja vode

Viscoelasticity characteristics of wood at the change of moisture content

Pregledni rad • Review paper

Prispjelo - received: 20. 04. 2004. • Prihvaćeno - accepted: 24. 11. 2004.

UDK 630*812.703

SAŽETAK • U radu su dani pregled i analiza literature koja se odnosi na viskoelastično ponašanje drva u uvjetima promjenjivog sadržaja vode. Prikazani su i kritički razmotreni neki najznačajniji rezultati iz literature koji daju odgovarajuće modele za proračun i praćenje puzanja u ovisnosti o vremenu. Uočene su i komentirane neke razlike objašnjenja puzanja u usporedbi s istim utjecajnim čimbenicima.

Ključne riječi: viskoelastičnost, drvo, puzanje, model

ABSTRACT • This paper presents a review and analysis of reference literature for wood viscoelasticity under variable moisture content. Some of the most important results from the literature are presented and critically reviewed. They provide suitable models for estimating and understanding creep depending on time. Some differences in the explanation of creep, related to the same influential factors, are considered and discussed.

Key words: viscoelasticity, wood, creep, models

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Drvo i proizvodi od drva imaju elastična i viskozna svojstva i ubrajaju se u viskoelastične materijale. Viskoelastično ponašanje drva vrlo je složeno i postojeće ga teorije opisuju nestacionarnim relacijama između sila, deformacija, temperature i sadržaja vode. Dva važna svojstva viskoelastičnog ponašanja drva koja se pojavljuju s vremenom jesu puzanje pri stalnom opterećenju i relaksacija opterećenja pri stalnoj deformaciji. Te dvije vrste viskoelastičnog ponašanja određuju se sljedećim

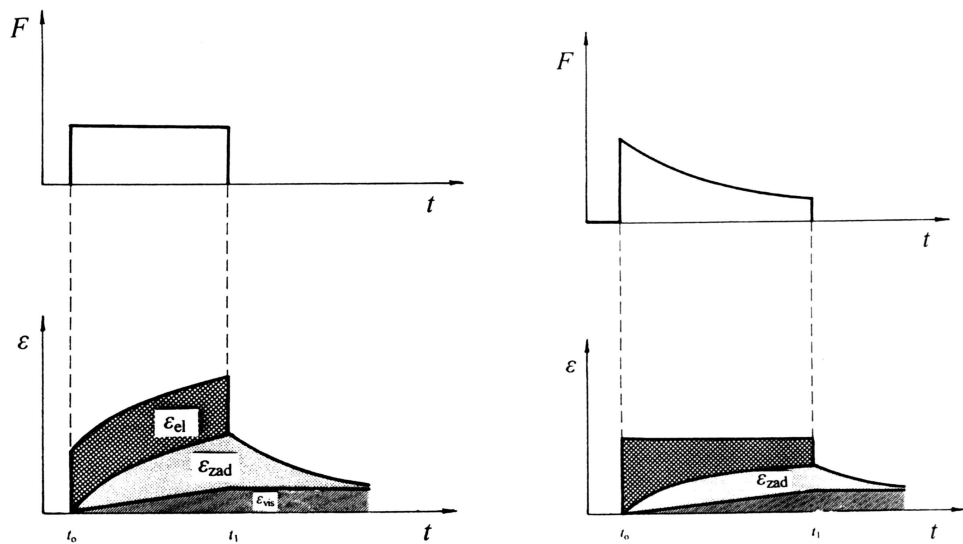
testovima. Pri puzanju uz stalno naprezanje drvo se optereti konstantnom silom i zatim se prati deformacija u ovisnosti o vremenu. U trenutku opterećenja dolazi do elastične deformacije koja se s vremenom povećava. Ta se pojava u drva naziva puzanje. Pri rasterećenju se deformacija smanji približno za vrijednost elastične deformacije (E_{el} u trenutku opterećenja). Deformacija puzanja sastoji se od reverzibilne elastične deformacije (E_{zad}) i viskozne deformacije (E_{vis}), koja je ireverzibilna (slika 1).

¹Autori su viši asistent i docent na Strojarskom fakultetu Sveučilišta u Sarajevu, Bosna i Hercegovina. ²Autor je redoviti profesor na Biotehničkom fakultetu, na Odsjeku za drvenu industriju Sveučilišta u Ljubljani, Slovenija.

¹Authors are senior assistant and assistant professor at Faculty of machine engineering, Sarajevo University, Bosnia and Herzegovina. ²Author is professor at Biotechnical faculty, Wood technology department, Ljubljana, Slovenia.

Slika 1. Ovisnost deformacija ε i opterećenja F o vremenu t pri puzanju (lijeva strana) i pri rasterećenju (desna strana) - preuzeto iz Bodig i Jayne, 1982

Figure 1
Strain and stress history for creep (left side) and relaxation (right side), Bodig and Jayne, 1982.



U drugom testu, testu rasterećenja (relaksacije), prati se opterećenje koje je potrebno za održavanje konstantne deformacije. Nakon toga opterećenje se s vremenom smanjuje, a ta se pojava naziva popuštanjem opterećenja ili rasterećenje. U teoriji viskoelastičnosti postoje standardni mehanički modeli koji se koriste za opisanje viskoelastičnih svojstava materijala. Modeli su sastavljeni u serijskoj, paralelnoj ili kombiniranoj vezi opruge odgovarajuće elastičnosti i prigušivača s određenom viskoznom komponentom. Najjednostavniji modeli su Maxwellov, Kelvinov i standardni linearni model. Jednadžbe koje opisuju puzanje i rasterećenje za navedene modele dali su Skrzypek i Hetnarski (1993).

Maxwellov model čini serijska veza opruge i prigušnog elementa (slika 2.a) s relaksacijskim modulom elastičnosti:

$$E(t) = E_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right); \quad \tau = \frac{\eta}{E_0} \quad (1)$$

i modulom puzanja: $J(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{t}{\eta} \quad (2)$

gdje je E_0 modul elastičnosti opruge, η viskoznost, τ vrijeme rasterećenja, a t vrijeme.

Kelvinov model čini paralelna veza opruge i prigušenog elementa (slika 2.b), s relaksacijskim modulom elastičnosti

$$E(t) = E_0 + \eta \delta(t) \quad (3)$$

i modulom puzanja

$$J(t) = \frac{1}{E_0} (1 - \exp(-\frac{t}{\tau})) \quad (4)$$

Postoji više interpretacija standardnoga linearnog modela. Najjednostavniji model koji zadovoljavajuće opisuje linearno viskoelastično ponašanje drva pri konstantnom sadržaju vode i temperaturi jest četve-roparametarski Burgerov model (slika 2.c), s relaksacijskim modulom elastičnosti

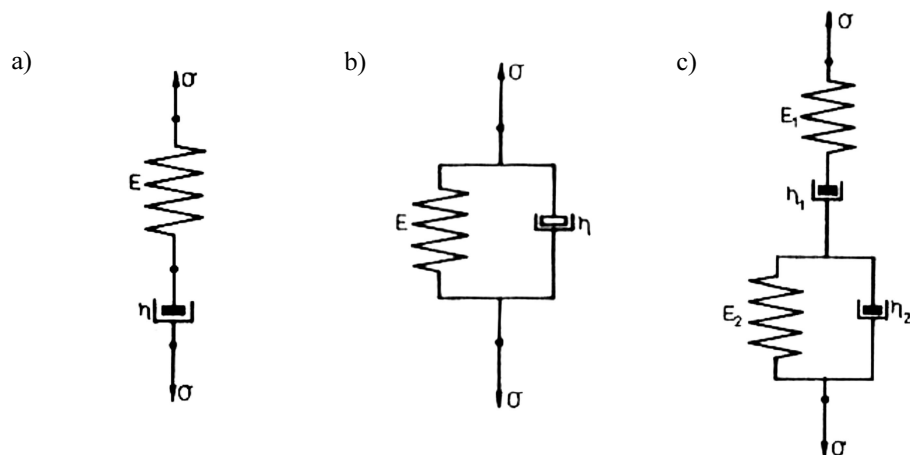
$$E(t) = \frac{1}{A} ((q_1 - q_2 r_1) \exp(-r_1 t) - (q_1 - q_2 r_2) \exp(-r_2 t)) \quad (5)$$

$$r_1 = \frac{p_1 - A}{2p_2}, \quad r_2 = \frac{p_1 + A}{2p_2}, \quad A = \sqrt{p_1^2 - 4p_2}$$

$$p_1 = \frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1}{E_2} + \frac{\eta_2}{E_2}, \quad p_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2}, \quad q_1 = \eta_1$$

Slika 2. Mehanički modeli: a) Maxwellov, b) Kelvinov i c) Burgerov (Skrzypek i Hetnarski, 1993)

Figure 2
Mechanical models: a) Maxwell's; b) Kelvin's, and c) Burger's (Skrzypek and Hetnarski, 1993)



$$q_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2},$$

i modulom puzanja:

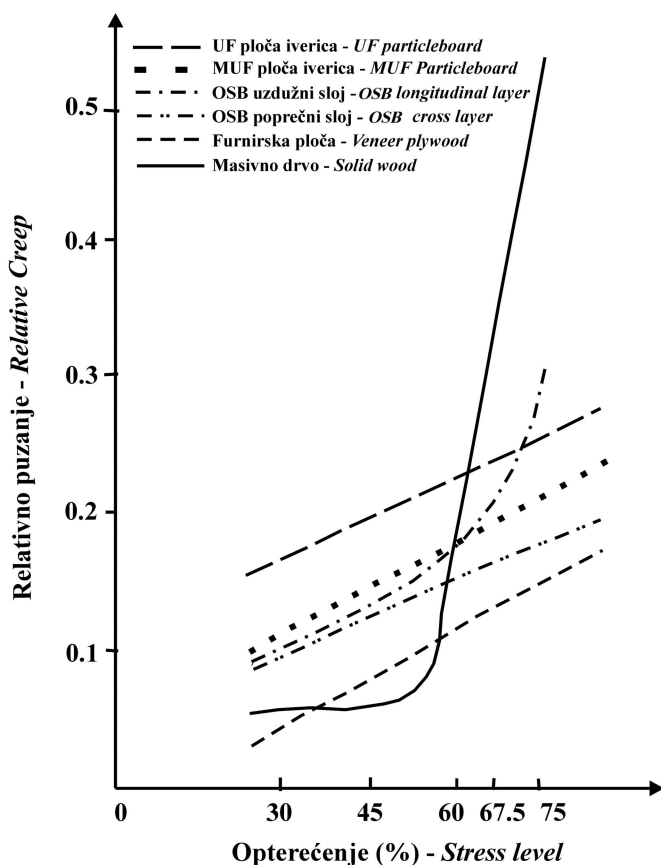
$$J(t) = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - \exp(-\frac{tE_2}{\eta_2})) \right) + \frac{t}{\eta_1}.$$

2 PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

2 REVIEW

Viskoelastično ponašanja drva i proizvoda na bazi drva intezivno je istraživano posljednjih 40 godina. Već je prije bio poznat problem da se pri vremenski dugim opterećenjima drva smanjuje njegova čvrstoća na savijanje. Godine 1947. objavljena je madisonska krivulja prema kojoj stabilnost konstrukcije i vijek trajanja ovise o povijesti opterećenja. Do određene granice opterećenja, pri konstantnom sadržaju vode i temperaturi, drvo se ponaša kao linearni viskoelastični materijal. To su

opterećenjima drvo ponaša kao elastični materijal. Pri srednjim vrijednostima opterećenja drvo se ponaša linearno viskoelastično, a pri visokim opterećenjima izrazito nelinearno. Bodig i Jayne (1982) za masivno drvo i Dillard i sur. (1989) za kompozite naglasili su da viskoelastična svojstva ovise o temperaturi, sadržaju vode i fizičkom starenju. Povećanje temperature s vremenom smanjuje krutost i povećava viskoelastična svojstva drva opterećenoga na savijanje, tlak ili vlak. Tu su tezu svojim eksperimentima potvrdili Davidson (1962), Kingston i Budgen (1972), Schniewind (1968), Liu i Ódeen (1989), Dwianto i sur. (2000). Istraživanja pokazuju da u temperaturnom području između 20 i 50 °C puzanje s vremenom raste, a preko 50 °C puzanje raste s većim intenzitetom. Eksperimenti također pokazuju da je puzanje veće na uzorcima koji su bili izloženi variranju temperature u području 20 i 50 °C nego na



Slika 3. Odnos relativnog puzanja i stupnja opterećenja za masivno drvo i kompozite od drva (Dinwoodie i sur., 1990)

Figure 3
Relation between relative creep and stress level for solid wood and composite of wood (Dinwoodie et al., 1990)

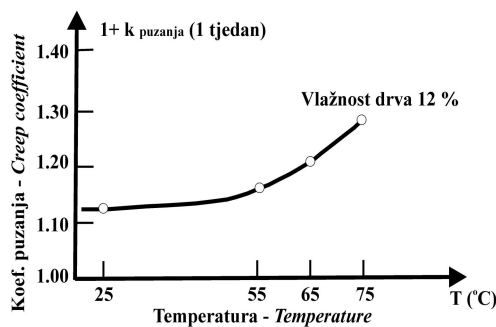
potvrdila brojna istraživanja: Pentoney i Davidson (1962), Nakai i Grossman (1983), Bazant (1985), Schniewind i Lyon (1973), Dinwoodie i drugi (1990). Sumirajući rezultate tih istraživanja, možemo zaključiti da se pri dovoljno niskim opterećenjima, sadržaju vode, temperaturi i dugotrajnim

uzorcima koji su bili izloženi konstantnoj maksimalnoj temperaturi.

Voda u drvu djeluje kao plastifikator, i s povećanjem njezina sadržaja puzanje se povećava (Schniewind, 1968; Bodig i Jayne, 1982). Radi lakše provedbe eksperimenta i lakšeg mjerenja većih deformacija,

Slika 4. Utjecaj promjene temperature na koeficijent puzanja smreke pri konstantnom sadržaju vode (Morlier, 1994)

Figure 4
Influence of temperature change on creep coefficient of spruce at constant moisture (Morlier, 1994)



većina istraživanja puzanja rađena je na uzorcima koji su opterećeni na progib. Puzanje drva pri cikličnim promjenama sadržaja vlage najslabije je objašnjena pojava. Deformacija (progib) opterećenog elementa, koji prođe kroz jedan ili više ciklusa promjene sadržaja vode, veća je nego ako bismo opterećeni element klimatizirali u jednom od oba ekstremna uvjeta sadržaja vode. Tu su pojavu opisali Armstrong i Kingston (1960), i Hearmon i Paton (1964). Oni su ustanovili da je puzanje pri promjeni sadržaja vode veće od puzanja pri konstantnom sadržaju vode. Također, veličina puzanja ovisi o veličini i brzini promjene sadržaja vode. Taj fenomen objašnjava Grossman (1976) i naziva ga *mechanosorptive creep*. On opisuje razliku između viskoelastičnog puzanja i *mehanosorptivnog puzanja*.

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t-\tau) d\sigma(\tau) + \int_0^t \int_0^t K(t-\tau_1, t-\tau_2) d\sigma(\tau_1) du(\tau_2) + \int_0^t u(t-\tau) du(\tau) \quad (7)$$

Ukupna je deformacija:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{vc} + \varepsilon_{ms} + \varepsilon_s$$

gdje je ε_{ms} *mehanosorptivna* deformacija, ε_{vc} viskoelastično puzanje, ε_s bubrenje i utezanje. Značajna objašnjenja mehanizma *mehanosorptivnog* puzanja svojim su istraživanjima dali Hoffmeyer i Davidson (1989), Hunt (1989,1999), Hanhijäri i Hunt (1998), Toratti (1992), Morlier (1994), Bengston (1999). Iz rezultata tih istraživanja, kao i iz niza drugih, mogu se izdvojiti sljedeći utjecajni čimbenici na *mehanosorptivno* puzanje:

- anatomska građa drva (reološka svojstva drva zasnivaju se na građi i kemizmu stanične stijenke)
- opterećenje (pri konstantnom sadržaju vode i temperaturi, granica linearnosti je do 40 % opterećenja)
- povijest opterećenja
- vrijeme (linearno viskoelastično ponašanje ovisi o vremenu opterećenja dok *mehanosorptivno* ne ovisi izravno o vre-

menu opterećenja)

- sadržaj vode u drvu (*mehanosorptivno* puzanje ovisi o promjeni sadržaja vode u drvu)
- promjena sadržaja vode u drvu (*mehanosorptivni* efekti nisu prouzročeni konstantnim gradijentom sadržaja vode nego nastaju zbog promjena koncentracije vode)
- povijest promjene sadržaja vode u drvu (prva promjena sadržaja vode bez obzira na apsorpciju ili desorpciju povećava puzanje, dok kasnije desorpcija povećava deformaciju, a apsorpcija je smanjuje)
- temperatura
- povijest promjene temperature.

2.1 Modeli *mehanosorptivnog* puzanja

2.1 Mechano-sorptive models

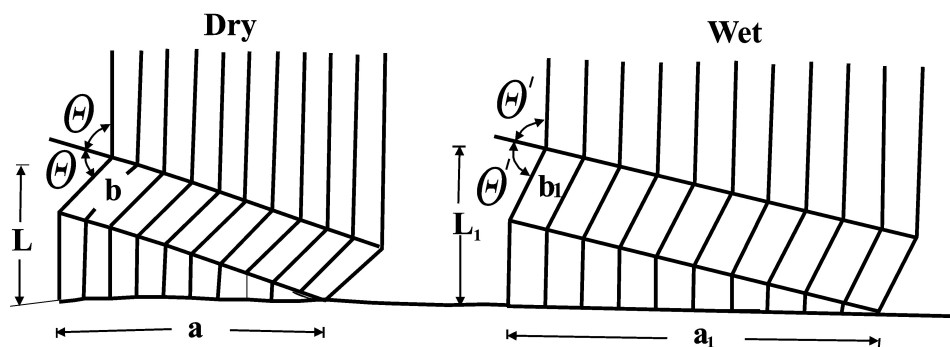
Cilj u većine radova bilo je kvantificiranje puzanja odgovarajućim modelom. To su pretežito matematički modeli i s obzirom na mikrostrukturu drva, rezultati su se dobro slagali s eksperimentom. Ranta-Maunus (1975) teorijom hidroviskoelastičnosti opisuje funkcionalnu ovisnost deformacije o opterećenju, sadržaju vode i temperaturi. Tu ovisnost opisuje konstitutivnom relacijom (7):

gdje su t i τ vremenske variable, $\varepsilon(t)$ deformacija, $J(t)$ puzanje, u promjena vlage, a K konstanta.

Mukudai i Yata (1986, 1987) predlažu reološke modele koji nastaju klizanjem stanične stijenke. Model se sastoji od dva paralelna Burgerova elementa (slika 2.c) od kojih jedan predstavlja vanjski, a drugi unutarnji sloj stanične stijenke. Kada je sadržaj vode konstantan, slojevi su stijenki uklješteni i nema puzanja. Pri promjeni sadržaja vode dolazi do klizanja između slojeva stijenki koji zovemo *mehanosorptivna* deformacija.

Hoffmeyer i Davidson (1989) daju model kojim objašnjavaju *mehanosorptivno* puzanje drva opterećenog aksijalno na tlak i progib. Njihovo se istraživanje temelji na ravninama klizanja u staničnoj stijenci.

Ravnine klizanja nastaju kidanjem vodikovih veza zbog difuzije vlage, a njihov broj izravno ovisi o intenzitetu difuzije vode. Ravnine klizanja mogu se vidjeti elektronskim mikroskopom (slika 5). Autori



Slika 5. Model klizne ravnine u srednjem sloju suhe i vlažne sekundarne stijenke u uzdužnom presjeku (Hoffmeyer i Davidson, 1989)

Figure 5
Model of slip plane as seen in a longitudinal section of the S_2 wall in dry and wet condition (Hoffmeyer and Davidson, 1989)

Značenje oznaka (Meaning of the symbols):

L (kraća) i L_1 (duža) ravnina klizanja; a , b (kraće, suho) i a_1 , b_1 (duže, vlažno) dimenzije srednjeg sloja sekundarne stijenke; Θ je kut otklona drvene ravnine

L (shorter, dry) and L_1 (longer, wet) lengths of the slip plane; a , b (shorter, dry) i a_1 , b_1 (longer, wet) dimensions of S_2 ; Θ is the slip plane angle changes.

objašnjavaju da se zbog bubrenja srednjeg sloja stanične stijenke (povećanje duljine od duljine a na duljinu a_1) povećava dužina ravnine klizanja (od kraće duljine L u suhog drva do veće duljine L_1 u mokrog drva).

Mohager i Torati (1993) dali su rezultate testa puzanja pri dugim vremenskim opterećenjima i velikom broju ciklusa promjene sadržaja vode. Osim velikog broja ciklusa promjene sadržaja vode, nije nađena granica mehanosorptivnog puzanja. Kombinirani model (jednadžba 10) dao je dobre rezultate slaganja s eksperimentom (slika 7):

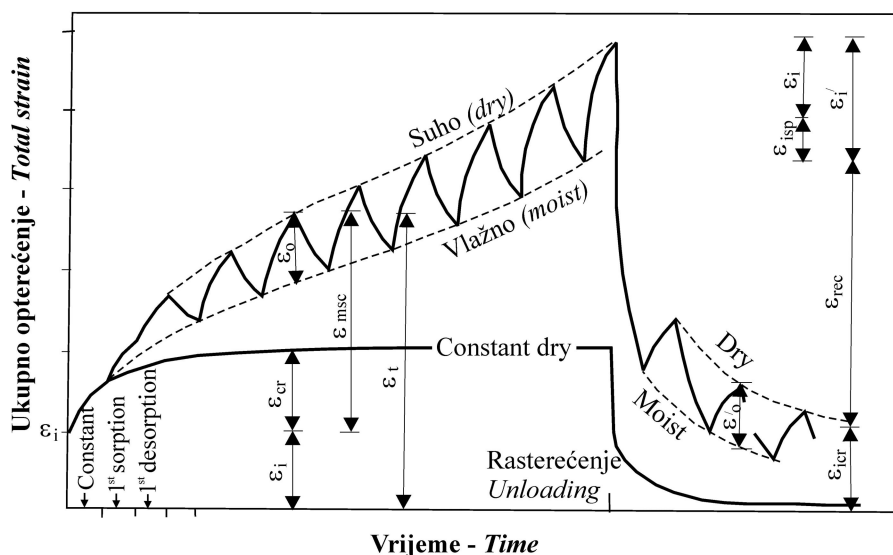
$$\operatorname{tg}\theta_1 = (a_1/a)\operatorname{tg}\theta \quad (8)$$

$$\Delta L = L_1 - L = b(\cos 2\theta - \cos 2\theta_1) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{ms}(t) = J^{\infty} \int_0^t \left[1 - \exp\left(-c \left(\sum_0^t |\Delta u| - \sum_0^{t'} |\Delta u| \right) \right) \right] \delta\sigma(t') \quad (10)$$

Primjenjujući taj model, autori su dobili krivulju mehanosorptivnog puzanja (slika 6).

gdje je ε_{ms} mehanosorptivna deformacija; $J^{\infty} = 0,7 J_0(U_{ref})$ - modul puzanja; t , t' - vremenske varijable; u - vlažnost; c - konstanta.



Slika 6. Krivulja mehanosorptivnog puzanja drva opterećenog na tlak i progib (Hoffmeyer i Davidson, 1989)

Figure 6
Typical mechano-sorptive creep curve for wood subjected to compression and bending (Hoffmeyer and Davidson, 1989)

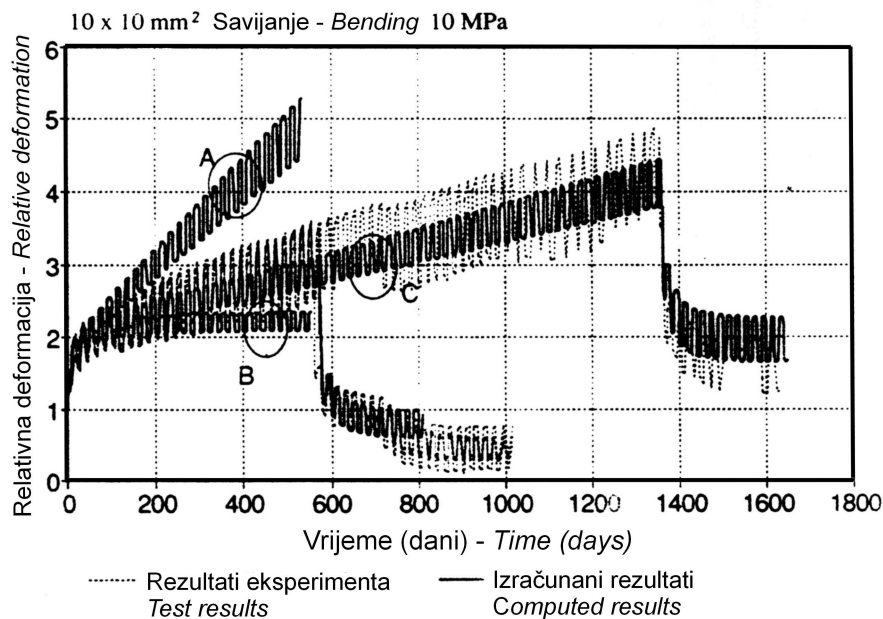
Značenje oznaka (Meaning of the symbols):

ε_0 - amplituda mehanosorptivnog puzanja; ε_i - početna elastična deformacija; ε_i' - povratna elastična deformacija; ε_{isp} - dodatna elastična deformacija; ε_{rec} - zadržana deformacija; ε_{msc} - mehanosorptivna deformacija; ε_0' - amplituda vibracije nakon rasterećenja

ε_0 - amplitude of mechano-sorptive creep; ε_i - initial elastic deformation; ε_i' - elastic recovery; ε_{isp} - elastic deformation stored in the slip planes; ε_{rec} - delayed recovery; ε_{msc} - mechano-sorptive deformation; ε_0' - amplitude of oscillation after unloading.

Slika 7. Usporedba rezultata eksperimenta i odgovarajućih izračunanih rezultata primjenom različitih modela: A - linearni model; B - ograničeni model puzanja; C - kombinirani model (Mohager i Torati, 1993)

Figure 7
Comparison of test results and corresponding computed results using different models: A - linear model; B - creep limit model; C - combined model. (Mohager and Torati, 1993)



Lu i Leicester (1997) koriste se Fickovim zakonom za analizu gradijenta sadržaja vode u klimatski promjenljivoj sredini. Kombinirajući ga s jednostavnim modelom, autori analiziraju opterećenja i deformacije u nosaču pravokutnoga poprečnog presjeka:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2; \Delta \varepsilon_1 = \frac{\Delta \sigma}{E}; \Delta \varepsilon_2 = (\sigma / E) \Delta \alpha \quad (11)$$

gdje je ε ukupna deformacija; ε_1 elastična deformacija; ε_2 mehanosorptivna deformacija; E modul elastičnosti; $\Delta \alpha = -k \Delta m$ inkrementalni faktor puzanja; k - koeficijent; Δm - inkrement promjene sadržaja vode.

sustav parcijalnih diferencijalnih jednačbi, što je matematički model viskoelastičnog ponašanja drva i proizvoda od drva.

Osnovne jednačbe

Viskoelastično ponašanje materijala opisuju ove jednačbe (Thomas i dr., 1980):

- jednačba bilance količine gibanja

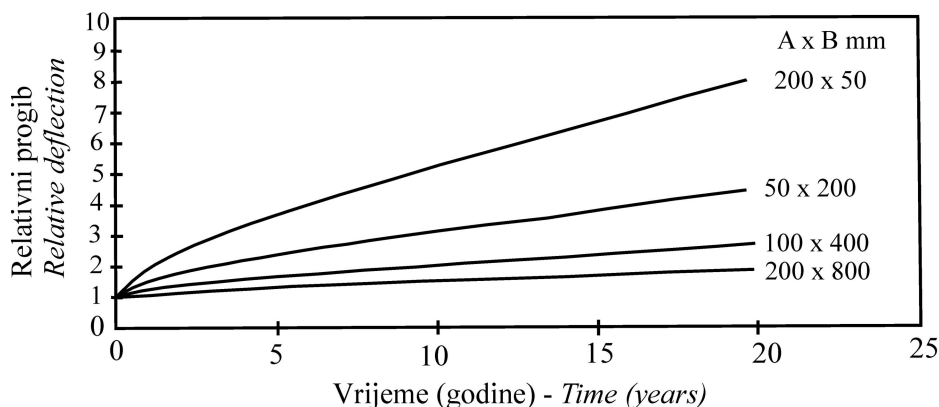
$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} \right) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (12)$$

- jednačba bilance energije,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_q T) = - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} + \rho s_q \quad (13)$$

Slika 8. Relativna mehanosorptivna deformacija za različite pravokutne presjeke drvene grede (Lu i Leicester, 1997)

Figure 8
Relative mechano-sorptive deformation for different rectangular cross-sections of wood beams (Lu and Leicester, 1997)



Indikativno je da je puzanje površinskih slojeva grede veće nego u njezinoj sredini.

Viskoelastično ponašanje drva pri promjeni sadržaja vode i temperature može se opisati osnovnim jednačbama mehanike kontinuuma. One, uz konstitutivne relacije te početne i granične uvjete, čine zatvoreni

koja povezuje promjenu unutarnje energije u jedinici vremena i po jedinici volumena s difuzijom topline, i

- jednačba bilance mase

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_m M) = - \frac{\partial m_j}{\partial x_j} + \rho s_m \quad (14)$$

koja povezuje promjenu mase vlage u jedinici vremena i po jedinici volumena s difuzijom vode. U tim jednadžbama t je vrijeme, x_j prostorne koordinate točke, ρ gustoća, c_q i c_m specifična toplina i specifični sadržaj vode, T temperatura materijala, M potencijal sadržaja vode, u_i komponente vektora pomaka, q_j i m_j komponente vektora toplinskoga i masenog toka, σ_{ij} komponente tenzora opterećenja, s_q i s_m izvori topline i vode u jedinici vremena i po jedinici mase, b_i komponente masene sile.

Konstitutivne relacije

Jednadžbe od (12) do (14) čine otvoreni sustav u kojemu su nepoznate T , M , q_j , m_j , u_j , σ_{ij} . Da bi se taj sustav zatvorio, koriste se sljedeće konstitutivne relacije (Horman, 2000):

- toplinski tok

$$q_j = -k_{jl}^q \frac{\partial T}{\partial x_l} + v m_j \quad (15)$$

- maseni tok

$$m_j = -k_{jl}^m \frac{\partial M}{\partial x_l} - \delta k_{jl}^m \frac{\partial T}{\partial x_l} \quad (16)$$

Pri određivanju funkcionalne ovisnosti između deformacija i opterećenja viskoelastičnih materijala primjenjuje se Boltzmanov princip superpozicije. Konstitutivna relacija koja uključuje utjecaj temperature i sadržaja vode može se napisati u obliku (Džaferović, 2002):

$$\sigma_{ij} = \int_0^t 2\eta(t-\tau) d\varepsilon_{kl}(\tau) + \left\{ \int_0^t \lambda(t-\tau) r d\varepsilon_{kl}(\tau) - \int_0^t 3K(t-\tau) \alpha_{ij} dT - \int_0^t \beta_{ij}(t-\tau) dM \right\} \quad (17)$$

U relacijama (15) do (17) su k_{jl}^q i k_{jl}^m komponente tenzora koeficijenata provođenja topline, odnosno vode, v je odnos koeficijenata difuzije pare i koeficijenata totalne difuzije vode, r toplina isparavanja, δ termogradijentni koeficijent, α_{ij} komponente tenzora koeficijenta toplinskog širenja, β_{ij} komponente tenzora vlažnosnog skupljanja, ε_{kl} komponente tenzora deformacije, t i τ reducirano vrijeme, $\eta(t-\tau)$ modul smicanja, $K(t-\tau)$ volumni modul. Reducirano vrijeme može se računati izrazom

$$t = \int \frac{du}{a_t}, \quad (18)$$

gdje je u vremenska podintegralna varijabla koja odgovara vremenskom koraku $d\tau$, a_t faktor pomaka koji se po Hanhijärvi (1999) računa izrazom

$$a_t = k_t(T - T_{ref}) + k_u(u - u_{ref}) \quad (19)$$

u kojemu je T temperatura, T_{ref} referentna temperatura, u promjena sadržaja vode, u_{ref} referentna promjena sadržaja vode, a k_t i k_u koeficijenti.

3 ZAKLJUČCI 3 CONCLUSIONS

Viskoelastično ponašanje drva i drvnih materijala kompleksna je pojava koja nije u cijelosti razjašnjena. Dosadašnja istraživanja uglavnom su rađena na masivnom drvu bez grešaka i relativno malih dimenzija. U razvijenim matematičkim modelima drvo je većinom promatrano kao izotropan materijal. Viskoelastična svojstva drva važna su za stabilnost konstrukcije, kao i za njihova eksploatacijska svojstva. Stoga ih je nužno dalje istraživati, i to na više područja:

- utjecaj kemizma građe drva i mikro strukture na viskoelastična svojstva
- analiza ponašanja za različite vrste opterećenja (tlak, vlak, savijanje)
- proširenje postojećih ili postavka novih matematičkih modela u području viskoelastičnosti, za analizu opterećenja i deformacija tih materijala
- razvoj numeričke metode za rješavanje viskoelastičnih deformacija drva primjenom razvijenoga matematičkog modela koji obuhvaća utjecaje kako temperature i sadržaja vode, tako i reoloških svojstava drva.

4 LITERATURA 4 REFERENCES

1. Armstrong, L.D.; Kingston, R. 1960: Effect of moisture content changes of wood. *Nature*, 185 (4716): 862-863.
2. Bazant, Z.P. 1985: Constitutive equation of wood at variable humidity and temperature. *Wood Science Technology*, 19: 159 - 177.
3. Bengston, C. 1999: Mechano-Sorptive Creep in Wood. Doctoral thesis, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. pp. 99.
4. Bodig, J.; Jayne, B.A. 1982: Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold, New York, p. 712.
5. Davidson, R.W. 1962: The influence of temperature on creep in wood. *Forest Products Journal*, 12: 377 - 381.
6. Dillard, D.A.; Gramoll, K.C.; Brinson, H.F. 1989: The implications of the fiber truss concept for creep properties of laminated composites. *Composite structures*
7. Dinwoodie, J.M.; Higgins, J.A.; Paxton, B.

