

BISTVENE LASTNOSTI VISKOELASTICNO TOPLOTNO ZGOŠČENEGA (VTC) LESA ZA NJEGOVO UPORABO V LESNIH KOMPOZITIH

Relevant properties of viscoelastic thermal compressed (VTC) wood for its utilization in wood-based composites

*Izleček: Les nizkogostotnega hibridnega topola (*Populus deltoides* x *Populus trichocarpa*) iz plantažnega nasada na severozahodu Oregona smo zgotovili s postopkom viskoelastične toplotne zgoščitve (VTC). Zgoščenim preizkušancem smo ugotovili upogibno trdnost in modul elastičnosti s tritočkovnim upogibnim testom. Ker so za potencialno uporabo zgoščenega lesa bistvene tudi njegove lepilne lastnosti in dimenzijska obstojnost, smo določili povratek tlačne deformacije po 24-urnem namakanju v vodi in ugotavljali strižno trdnost lepilnega spoja s klasičnim natezno strižnim testom. Ugotovili smo, da so se upogibne lastnosti VTC lesa bistveno izboljšale zaradi povečane gostote. Kljub majhni penetraciji lepila in hidrofobnemu značaju površine VTC lesa so rezultati mehanskih testov pokazali, da je lepljenje VTC lesa popolnoma primerljivo lepljenju nezgoščenega lesa in v nekaterih primerih celo boljše. Edina ugotovljena pomanjkljivost VTC lesa je bil 45 % povratek tlačne deformacije po namakanju v vodi. Zato smo modificirali VTC postopek in izvedli zgoščevanje v prisotnosti visokega tlaka vodne pare. Rezultati so pokazali, da je VTC les proizveden z novim modificiranim VTC postopkom dimenzijsko bistveno bolj stabilen, saj smo ugotovili zgolj 3 % povratek tlačne deformacije po 24-urnem namakanju v vodi. Ta ugotovitev predstavlja velik potencial za širšo uporabo VTC lesa v industriji lesnih kompozitov, vendar bo prej potrebno proučiti še kakovost lepljenja tega visoko stabilnega VTC lesa.*

Ključne besede: lepljenje, les, mehanske lastnosti, dimenzijska obstojnost, VTC, VTC lesni kompoziti, zgoščevanje

*Abstract: Low density hybrid poplar (*Populus deltoides* x *Populus trichocarpa*) from a plantation located in northeastern Oregon was densified using the viscoelastic thermal compression (VTC) process. The modulus of rupture and modulus of elasticity of VTC wood specimens were determined with three point bending tests. Since for effective utilization of densified wood adhesive bonding properties and dimensional stability of densified wood are of basic importance, set recovery after 24 hours water soaking and bond strength in longitudinal tensile shear with classical lap-shear tests were examined. It was found that the bending properties of the VTC wood were significantly improved due to the increased density of the VTC specimens. The hydrophobic behaviour of the VTC wood surface and the decreased effective penetration of the adhesive into the VTC wood did not affect the ability of the surface of the VTC wood to properly bond with the adhesive. The adhesive bond strength of the densified VTC specimens was similar or better than that of the control (undensified) specimens. The only defectiveness of the VTC wood was 45 % of the compressive deformation set recovery after water soaking. Therefore the VTC process was modified. The densification was performed in the presents of pressurized saturated steam. The results show that the VTC wood produced with the modified VTC process has significantly improved stability. After 24 hours of water soaking only 3 % of the compressive deformation set recovery was determined. These findings provide a variety of potential uses for VTC wood as raw material in the production of wood-based composites. However, bonding properties of this highly stable VTC wood has to be studied first.*

Key words: adhesive bonding, densification, dimensional stability, mechanical properties, VTC, VTC wood composites, wood

* ILTRA d.o.o., Celovška cesta 268, 1000 Ljubljana; Univerza na Primorskem, Primorski inštitut za naravoslovne in tehnične vede, Muzejski trg 2, 6000 Koper; andreja.kutnar@upr.si

** Oregon State University, Department of Wood Science and Engineering, 119 Richardson Hall, Corvallis, Oregon, USA; fred.kamke@oregonstate.edu

^f Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Rožna dolina c. VIII/34, 1001 Ljubljana, milan.sernek@bf.uni-lj.si

1. UVOD

Zgodovina zgoščevanja lesa sega v začetek 20. stoletja, ko so bili razviti prvi takšni postopki. Prvi postopek zgoščevanja s stiskanjem lesa v prečni smeri je bil »Staypak«. V Evropi je bil takšen postopek prvič izveden leta 1930 pod imenom »Lignostone«. Sledili so mu »Lignofol«, »Jicwood« in »Jablo« (Kollmann in sod., 1975). Našteti postopki izboljšajo določene mehanske lastnosti lesa, vendar dosežena deformacija s postopkom zgoščevanja ni stabilna. Ker ti postopki zgoščevanja niso primerno upoštevali plastičnosti lesa in stabilizacije končnega produkta, v praksi niso bili nikoli uporabljeni (Kollmann in sod., 1975). Produkti sodobnih razvitih postopkov zgoščevanja imajo sicer dobro dimenzijsko obstojnost, vendar se pri izpostavitvi klimi z visoko vlažnostjo pojavi ireverzibilen povratek tlačne deformacije, ki je posledica sprostitve med postopkom stiskanja nastalih notranjih napetosti. Ireverzibilen povratek tlačne deformacije je potrebno razlikovati od nabrekanja, ki je posledica higroskopske narave lesa. Ireverzibilen povratek tlačne deformacije je odvisen od celične strukture in lastnosti polimerov celičnih sten (Inoue in sod., 1993; Dwianto in sod., 1999; Navi in Girardet, 2000; Blomberg in Persson, 2004; Kamke in Sizemore, 2008).

V raziskavi, ki je predstavljena v tem članku, smo uporabili nedavno razvit postopek viskoelastične toplotne zgostitve (VTC), katerega produkt je VTC les visoke gostote, trdnosti in dimenzijske obstojnosti (Kamke in Sizemore, 2008). Z VTC postopkom se poveča gostota lesa s stiskanjem v prečni smeri, ko je les v zmehčanem stanju, nad točko steklastega prehoda. S kombinacijo pare in toplote ter mehanskim stiskanjem se poveča gostota lesa za 100 % do 300 %. Visoka temperatura in visok tlak vodne pare med postopkom stiskanja plastificirata les in preprečita lom lesnih celic pod ekstremnimi napetostmi. VTC les ima

spremenjene anatomske, fizikalne in mehanske lastnosti. Spremenjena anatomsko zgradba se izraža v stisnjenih lumnih in deformiranih celičnih stenah, brez lomov (Kutnar in sod., 2009).

Za učinkovito izrabo zgoščenega lesa v lesnih kompozitih so bistvene njegove mehanske in lepilne lastnosti. Zato je bil namen raziskave ugotoviti upogibno trdnost, modul elastičnosti in lepilne lastnosti VTC lesa. Poglavitna je tudi obstojnost tlačne deformacije po izpostavitvi visokim vlažnostim. Raziskovalci so dokazali, da lahko ireverzibilno nabrekanje eliminiramo s parjenjem in segrevanjem ter tako dosežemo trajno fiksacijo tlačne deformacije (Dwianto in sod., 1999; Inoue in sod., 1993; Inoue in sod., 2008). Zato smo modificirali VTC postopek in določili povratek tlačne deformacije modificiranega VTC lesa po namakanju v vodi.

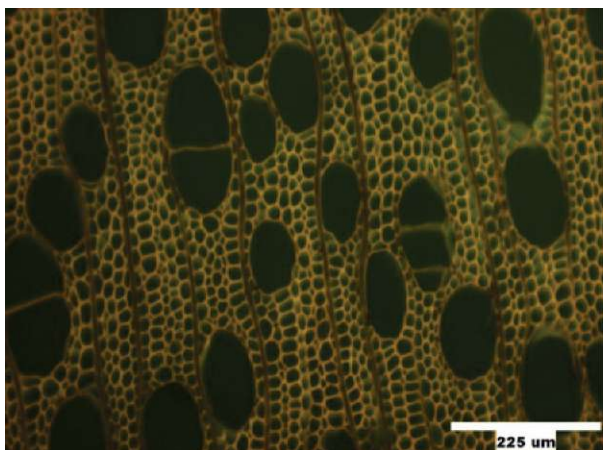
2. MATERIALI IN METODE

V raziskavah smo uporabili les nizkogostotnega hibridnega topola (*Populus deltoides* x *Populus trichocarpa*) iz plantažnega nasada na severozahodu Oregona, ki smo ga zgostili z VTC postopkom (slika 1). Dolžina, širina in debelina vzorcev je bila 56 mm, 170 mm in 6 mm. Vzorci so bili brez vidnih anomalij. Debelina in širina vzorcev sta bili radialno-tangencialne usmerjenosti. Pred VTC postopkom in po njem so bili vzorci uravnovešeni v klimi s temperaturo 20 °C in 65 % relativno zračno vlažnostjo.

2.1. VTC POSTOPEK

VTC postopek se izvaja v napravi, ki je prikazana na sliki 2. Naprava omogoča vzpostavitev vzorcev visokim temperaturam in visokemu tlaku vodne pare. Natančen opis naprave je predstavljen v literaturi (Kamke, 2006).

VTC postopek je sestavljen iz treh faz, v katerih s kombina-



Slika 1: Svetlobna mikroskopija: hibridni topol (*Populus deltoides* x *Populus trichocarpa*); (levo prečni prerez, desno - tangencialni prerez).

cijo pare in toplote ter mehanskim stiskanjem povečamo gostoto lesa. Celoten postopek zgostitve traja 15 min. Postopek se prične s parjenjem vzorca lesa pri tlaku vodne pare 860 kN m^{-2} . Vzorec je izpostavljen tlaku vodne pare brez mehanskega tlaka 3 min in nato še dodatni 2 min z mehansko tlačno silo 1380 kN m^{-2} . Sledi sprostitvev tlaka vodne pare in uravnovešanje brez mehanskega tlaka 100 s. Med fazo uravnovešanja se vzorcu zniža vlažnost. Pojavi se padec temperature. Naslednja faza se prične z vzpostavitev mehanske tlačne sile 4480 kN m^{-2} , ki traja 5 min. Hkrati se dvigne temperatura iz začetnih 175 °C na 200 °C . V zadnjem koraku se vzorce ohladi pod mehansko tlačno obremenitvijo (4480 kN m^{-2}) na 100 °C .

Z opisanim VTC postopkom smo zgostili deset vzorcev lesa z začetno debelino 6 mm na končno debelino 2,5 mm in dosegli 132 % stopnjo zgostitve.

2.1.1. Modificiran VTC postopek

Z namenom eliminacije ireverzibilnega nabrekanja smo modificirali v prejšnjem poglavju opisan VTC postopek. Vzorci so bili najprej 3 minute izpostavljeni tlaku nasičene vodne pare pri 170 °C brez mehanskega tlaka in nato še 3 minute z mehansko tlačno silo 5516 kN m^{-2} . Sledila je sprostitvev tlaka vodne pare in ohlajanje pod mehansko



Slika 2: VTC naprava.

tlačno obremenitvijo na 100 °C . Karakteristike modificiranega VTC postopka so natančno opisane v Kutnar in Kamke (2010).

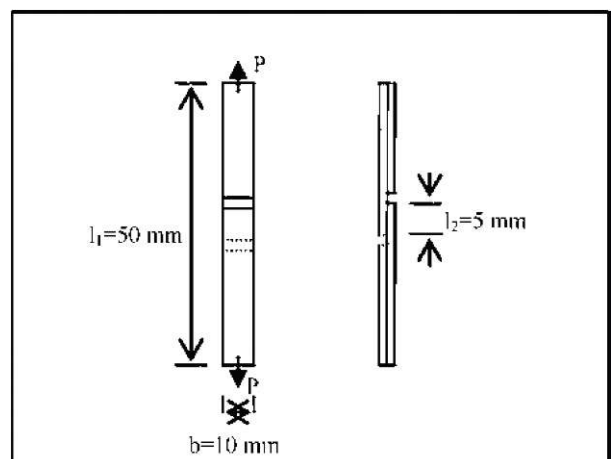
Z modificiranim VTC postopkom smo zgostili deset vzorcev lesa z začetno debelino 6 mm s tlačno silo 5516 kN m^{-2} . Za razliko od vzorcev, zgoščenih s klasičnim VTC postopkom pri modificiranem VTC postopku, nismo uporabili mehanskih okvirjev za nadziranje končne debeline VTC lesa.

2.2 DOLOČITEV MEHANSKIH LEPILNIH LASTNOSTI VTCLESA

Kontrolnim in VTC vzorcem smo ugotovili upogibno trdnost in modul elastičnosti s tritočkovnim upogibnim testom (Kutnar in sod., 2008b). Poleg raziskovanja upogibnih lastnosti VTC lesa smo se v raziskavi osredotočili tudi na njegove lepilne lastnosti oziroma adhezijo pri lepljenju (Kutnar in sod., 2008a; Kutnar in sod., 2008b). Uporabili smo fenol-formaldehidno (FF) lepilo (Georgia - Pacific Resins, Inc) z viskoznostjo 330 mPa s. Kontrolne in VTC vzorce smo zlepili v vroči stiskalnici pri 150 °C . Sledilo je testiranje kvalitete zlepljenosti kontrolnega in VTC lesa. Ugotovili smo strižno trdnost lepilnega spoja s klasičnim natezno strižnim testom (SIST EN 302-1, 2004) (slika 3) (Kutnar in sod., 2008a).

2.2. POVRATEK TLAČNE DEFORMACIJE

Za določitev povratka tlačne deformacije VTC lesa smo pripravili vzorce dimenzij $50 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$. VTC in VTC lesa, proizvedenega z modificiranim VTC postopkom, smo najprej uravnovesili v klimi s temperaturo 20 °C in 65 % relativno zračno vlažnostjo in zatem posušili do absolutno suhega stanja v sušilniku pri 103 °C , da smo določili začetno debelino vzorcev v absolutno suhem stanju in ravnovesno vlažnost lesa. Vzorce smo nato za 24 ur potopili v vodo in jih ponovno posušili do absolutno suhega



Slika 3: Geometrija vzorcev za klasični strižni test.

stanja. Povratek tlačne deformacije smo določili z enačbo 1 (Inoue in sod., 2008; Kutnar in Kamke, 2010).

$$\text{Povratek} = [t - t_c] / (t - t_c) \times 100 \quad (1)$$

kjer je t_s debelina VTC vzorca v absolutno suhem stanju po namakanju, t_c začetna debelina VTC vzorca v absolutno suhem stanju, in t , debelina vzorca pred VTC postopkom.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3.1 FIZIKALNE IN MEHANSKE LASTNOSTI VTC LESA

Z VTC postopkom smo povečali gostoto lesa iz 0,331 g cm⁻³ na 0,792 g cm⁻³, z modificiranim VTC postopkom pa na 1,19 g cm⁻³ (preglednica 1). Po uravnovešanju vzorcev v klimi s temperaturo 20 °C in 65 % relativno zračno vlažnostjo smo ugotovili, da je ravnovesna vlažnost VTC in VTC lesa, proizvedenega z modificiranim VTC postopkom, znižana na 7 %. S tri-točkovnimi upogibnimi testi VTC in kontrolnih vzorcev smo ugotovili, da je povečanje modula elastičnosti sorazmerno povečanju gostote, medtem ko je povečanje upogibne trdnosti nekoliko nižje kot bi pričakovali glede na povečanje gostote (preglednica 1). Povečanje mehanskih lastnosti VTC lesa je doseženo, ker viskoelastična toplotna zgostitev lesa uporablja ustrezno kombinacijo temperature in vodne pare, ki med postopkom stiskanja plastificirata les in preprečita lom lesnih celic pod ekstremnimi napetostmi (Kutnar in sod., 2009). Morfologija zgoščenega lesa je bistveno spremenjena, in sicer sorazmerno s stopnjo zgostitve. Višja je stopnja zgostitve, večje je zmanjšanje volumna praznih prostorov - lumnov trahej in vlaken.

3.2 LEPILNE LASTNOSTI VTC LESA

Rezultati mehanskih testov so pokazali, da je lepljenje VTC lesa popolnoma primerljivo lepljenju nezgoščenega lesa (preglednica 2). Določena strižna trdnost lepilnega spoja VTC lesa je bila višja od strižne trdnosti lepilnega spoja kontrolnega lesa. Kljub temu, da VTC postopek značilno spremeni njegove lastnosti, smo ugotovili, da niti nizka

površinska energija VTC lesa (Kutnar in sod., 2008c), niti majhna efektivna penetracija lepila v VTC lesu (Kutnar in sod. 2008b) ne povzročita slabe kvalitete lepljenja VTC lesa. Raziskave so pokazale, da je efektivna penetracija lepila odvisna od stopnje zgostitve (Kutnar in sod., 2008b), in sicer lepilo slabše penetrira v VTC les z večjo stopnjo zgostitve. Od stopnje zgostitve pa je bila odvisna tudi lokacija lepila v lesu. Medtem ko se je lepilo v nezgoščenem lesu nahajalo v lumnih trahej, se v VTC lesu pojavljalo tudi v lumnih vlaken in v celicah trakov.

Ugotovljeno je bilo tudi, da lepljenje VTC lesa z nezgoščenim lesom ni problematično, kljub temu, da se penetracija lepila izrazito razlikuje med kontrolnim in VTC lesom (slika 4) (Kutnar in sod., 2008b). Aplikacija VTC lesa za lesne kompozite je bila nazorno demonstrirana z izdelavo trislojnih VTC kompozitov (Kutnar in sod., 2008a). VTC les se je uporabil za zunanjo sloja kompozita, medtem ko je sredico sestavljal nezgoščen kontrolni les. Štiritočkovni upogibni testi VTC kompozitov so pokazali, da sta upogibna trdnost in modul elastičnosti kompozitov, izdelanih iz VTC lesa, višja od kompozitov, narejenih iz nezgoščenega lesa.

3.3 POVRATEK TLAČNE DEFORMACIJE

S testi povratka tlačne deformacije VTC lesa po 24-urnem namakanju v vodi je bilo ugotovljeno, da modificiran VTC postopek omogoča produkcijo VTC lesa z minimalnim povratkom tlačne deformacije po namakanju v vodi (preglednica 3). Zgoščevanje lesa ob prisotnosti tlaka vodne pare močno zmanjša ireverzibilno nabrekanje VTC lesa, kar nazorno prikazuje tudi slika 5. Prejšnje raziskave so pokazale, da povratek tlačne deformacije narašča s stopnjo zgostitve (Blomberg in sod., 2006; Kutnar in sod., 2009). V našem primeru pa je bil dosežen bistveno nižji povratek tlačne deformacije pri VTC lesu, proizvedenem z modificiranim VTC postopkom, ki je imel značilno višjo gostoto (preglednica 1). Kljub številnim raziskavam kemijskih sprememb med hidrotermično obdelavo lesa še vedno ni popolnoma jasno, kateri so glavni razlogi za te kompleksne spremembe. Hidrotermična obdelava lesa namreč pov-

zroči degradacijske reakcije lesnih komponent. Visoka temperatura in visok tlak vodne pare med VTC postopkom povzročita degradacijo hemiceluloz, oksidacijo in polimerizacijo lignina ter določenih ekstraktivov. Znano je, da nasičena vodna para vpliva na fizikalne in mehanske lastnosti lesa (Lenth in Kamke, 2001). Verjetno so

Preglednica 1: Gostota v absolutno suhem stanju, ravnovesna vlažnost in rezultati upogibnih testov kontrolnih in VTC vzorcev (n = 10).

	Gostota v absolutno suhem stanju [g cm ⁻³]	ravnovesna vlažnost* [%]	Upogibna trdnost [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]
Kontrolni les	0,331	12,0	76,1	8,70
VTC les	0,792	7,0	154	19,9
Modificiran VTC les	1,19	7,0	276	31,8

*Vzorci uravnovešeni v klimi s temperaturo 20 °C in 65 % relativno zračno vlažnostjo.

Preglednica 2: Primerjava strižne trdnosti (n = 10) lepilnega spoja kontrolnega in vTC lesa (standardni odklon je prikazan v oklepajih)

Table 2: Comparison of the shear strength (n = 10) of the bonded control specimens and the VTC specimens (the standard deviation is shown in parentheses)

	Strižna trdnost [MPa]	Odstotek loma po lesu [%]
Kontrolni les	5,55 (0,28)	50
VTC les	6,30 (0,87)	80

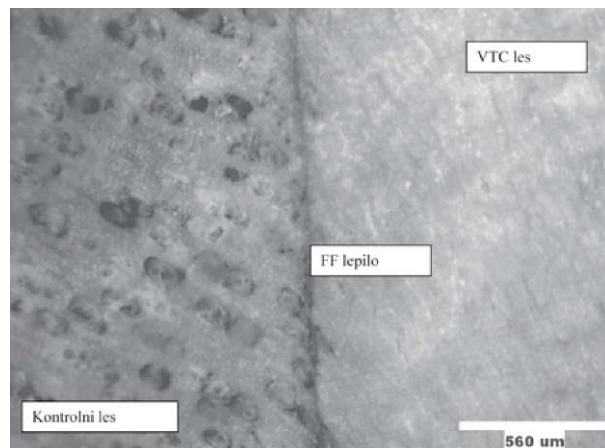
Preglednica 3: Povratek tlačne deformacije (n = 10) VTC lesa in VTC lesa, proizvedenega z modificiranim VTC postopkom (standardni odklon je prikazan v oklepajih)

	Povratek tlačne deformacije [%]
VTC	46,1 (23,1)
Modificiran VTC les	3,0 (1,68)

pogoji stiskanja vplivali na tvorjenje notranjih napetosti, ki povzročijo povratek tlačne deformacije (Kutnar in Kamke, 2010). Poleg tega se je zmanjšala higroskopnost VTC lesa. Količina povratka tlačne deformacije bi bila lahko posledica pretrganja zamrežitvenih vezi, ki bi povzročile povratek deformacije, in mehčanja lignina ter najverjetneje tvorjenja kovalentnih vezi v deformiranem (stisnjenem) stanju (Inoue in sod., 2008).

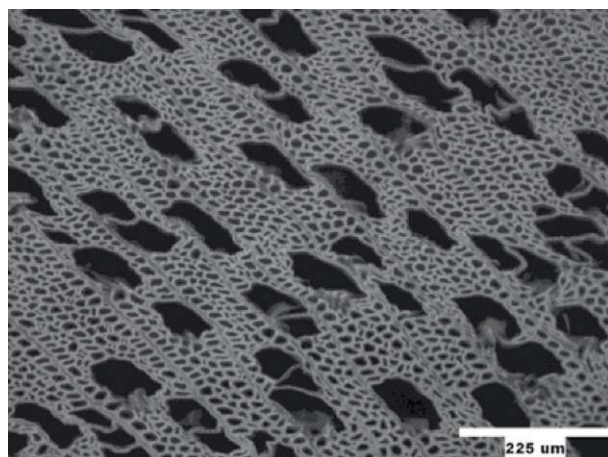
4. SKLEP

Zaradi visoke gostote, visokih mehanskih lastnosti in dobre dimenzijske obstojnosti ima VTC les velik pomen v



Slika 4: Prečni prerez lepilnega spoja med kontrolnim, netretiranim lesom in VTC lesom s 132 % stopnjo zgostitve. Temna področja prikazujejo prisotnost FF lepila. Površina je bila pripravljena z brušenjem v olje vklopljenih vzorcev (Kutnar in sod., 2008a).

prihodnjem razvoju lesne industrije. Dosedanje raziskave so pokazale, da ima VTC les višjo upogibno trdnost kot nezgoščen les. Higroskopnost VTC lesa je zaradi uporabe visoke temperature in nasičene vodne pare v VTC postopku bistveno zmanjšana. Morfologija zgoščenega lesa se bistveno spremeni, in sicer sorazmerno s stopnjo zgostitve. Celice lesa so deformirane v smeri zgostitve, brez loma celičnih sten. Spremenjene so lastnosti površine VTC lesa. Kljub zaprti površini in hidrofobnem značaju površine je kvaliteta lepljenja VTC lesa primerljiva kvaliteti lepljenja nezgoščenega lesa. Glavna pomanjkljivost VTC lesa je povratek tlačne deformacije po izpostavitvi visoki vlažnosti, vendar so rezultati te raziskave pokazali, da se



Slika 5: Svetlobna mikroskopija, prečni prerez: levo - vTC les in desno - les, proizveden z modificiranim vTC postopkom; obe sliki prikazujeta stanje po namakanju v vodi.

lahko doseže visoka obstojnost tlačne deformacije VTC lesa, če je ta proizveden s spremenjenim VTC postopkom. V modificiranem VTC postopku, v katerem je vzorec zgoščen ob prisotnosti tlaka nasičene vodne pare, pride do kemijskih sprememb in pretrganja notranjih vezi. Zato se notranje napetosti, zaradi katerih bi prišlo do znatnega povratka tlačne deformacije v klimi z visoko vlažnostjo, ne tvorijo. Ugotovitev raziskave ima bistven vpliv na bodočo uporabo VTC lesa v industriji lesnih kompozitov. VTC postopek namreč omogoča uporabo nizkogostotnega in juvenilnega lesa s slabimi mehanskimi lastnostmi v novih visokokakovostnih lesnih kompozitih. Vsekakor pa je potrebno proučiti še površinske in lepilne lastnosti modificiranega VTC lesa, saj je dobra dimenzijska obstojnost zgoščenega lesa zgolj ena, seveda izredno pomembna, lastnost za uporabo VTC lesa.

5. LITERATURA

1. **Blomberg j., Persson B. (2004)** Plastic deformation in small clear pieces of Scots pine (*Pinus sylvestris*) during densification with the Calignum process. *Journal of Wood Science*, 50,4: 307-314
2. **Blomberg j., Persson B., Bexell U. (2006)** Effects of semi-isostatic densification on anatomy and cellshape recovery on soaking. *Holzforschung*, 60: 322-331
3. **Dwianto W., Morooka T., Norimoto M., Kitajima T. (1999)** Stress Relaxation of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) Wood in Radial Compression under High Temperature Steam. *Holzforschung*, 53, 5: 541-546
4. **EN 302-1 (2004)** Adhesives for load bearing timber structures. Adhesives for load-bearing timber structures Test methods: Part 1: Determination of bond strength in longitudinal tensile shear strength.
5. **inoue M., Norimoto M., Tanahashi M., rowell M.R. (1993)** Steam or heat fixation of compressed wood. *Wood and Fiber Science*, 25, 3: 224-235
6. **inoue M., Sekino N., Morooka T., rowell R.M., Norimoto, M. (2008)** Fixation of compressive deformation in wood by pre-steaming. *Journal of Tropical Forest Science*, 20, 4: 273-281
7. **Kamke F.A. 2006.** Densified radiata pine for structural composites. *Maderas. Ciencia y tecnologia*, 8, 2: 83-92
8. **Kamke F.A., Sizemore H. (2008)** Viscoelastic thermal compression of wood. U.S. Patent Application No. US Patent No. 7.404.422
9. **Kollmann F.P., Kuenzi E.W., Stamm A.J (1975)** Principles of Wood Science and Technology. Vol. II: Wood Based Materials. Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin: 139-149
10. **Kutnar A., Kamke F.A., Sernek M. (2008a)** The mechanical properties of densified VTC wood relevant for structural composites. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 66, 6: 439-446
11. **Kutnar A., Kamke F.A., Nairn J.A., Sernek M. (2008b)** Mode II fracture behavior of bonded viscoelastic thermal compressed wood. *Wood and Fibre Science*, 40,3: 362-37312.
12. **Kutnar A., Kamke F.A., Petrič M., Sernek M. (2008c)** The influence of viscoelastic thermal compression on the chemistry and surface energetics of wood. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, 329: 82-86
13. **Kutnar A., Kamke F.A., Sernek M. (2009)** Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood. *Wood Science and Technology*, 43, 1: 57-68
14. **Kutnar A., Kamke F.A. (2010)** Influence of temperature and steam environment on set recovery of compressive deformation of wood. *Holzforschung* (poslano 10.2.2010)
15. **Ienth C.A., Kamke F.A. (2001)** Moisture dependent softening behavior of wood. *Wood and Fiber Science*, 33, 3: 492-507
16. **Navi P., Girardet F. (2000)** Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood. *Holzforschung*, 54, 3: 287-293