

UDK: 630*174.4

Problem kontaktne toplotne upornosti pri določevanju stacionarne enoosne toplotne prevodnosti prečno orientiranega lesnega tkiva

The problem of contact heat resistance in determining stationary monoaxial heat conductivity of transversely oriented wood tissue

avtorji **Bojan BUČAR, Miran MERHAR, Bojan GOSPODARIČ**, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Rožna dolina, C. VIII/34, SI-1000 Ljubljana

izvleček/Abstract

V članku je prikazana analiza vpliva kontaktne toplotne upornosti na toplotno prevodnost slojevitega nevezanega masivnega lesnega kompozita, izdelanega iz javorjevega lesa (*Acer pseudoplatanus*). Uporabljena je bila stacionarna eksperimentalna metoda z možnostjo zvezne nastavitve temperaturne razlike neodvisno od preizkušanca. Med eksperimentom je prišlo v seriji predhodno paralelno uravnovešenih preizkušancev do pojava občutnega vlažnostnega gradienta, kar je izključno posledica *Soret*-ovega efekta. Neposrednega vpliva nastalega vlažnostnega gradienta na toplotno prevodnost slojevitega kompozita nismo analizirali. Prikazani in pojasnjeni so rezultati opravljenih analiz. Hipoteza o significantnem vplivu kontaktne toplotne upornosti se je izkazala za pravilno.

The paper presents the analysis of the influence of contact heat resistance in heat conductivity of layered unbound massive wood composite made of maple wood (*Acer pseudoplatanus*). A sta-

tionary experimental method was used, permitting continuous temperature setting independently of the test specimen. During the experiment, a significant humidity gradient occurred in the series of previously conditioned test specimens, which was exclusively the result of the *Soret* effect. Direct influence of the resulting humidity gradient on heat conductivity of layered composite was not analysed. The results of the analyses performed are presented and clarified. The hypothesis of a significant influence of contact heat resistance has been proven correct.

Ključne besede: toplotna prevodnost lesa, kontaktni toplotni upor, *Soret*ov efekt, termodifuzija

Key words: thermal conductivity of wood, contact thermal resistance, *Soret* effects, thermal-diffusion

Uvod

Prenos toplote si v splošnem lahko predstavljamo kot prenos energije, ki ga pogojuje razlika temperatur. V osnovi poznamo tri osnovne načine prenosa toplote, in sicer konvekcijo, prevajanje oziroma kondukcijo ter sevanje, vsekakor pa je lahko prenos toplote glede na naravo prenosa tudi kombiniran.

S prevajanjem kot načinom prenosa toplote se srečamo tako pri trdnih snoveh kakor tudi pri fluidnih. Zaradi večjih medmolekularnih razdalj ter bolj neurejenega gibanja molekul je prevod toplote pri fluidnih manj učinkovit. Zaradi tega je toplotna prevodnost plinov in tekočin v splošnem manjša kot pri trdnih snoveh. Prevajanje toplote je nedvomno molekularen pojav. To je razvidno tudi iz podobnosti enačb, ki jih uporabljamo za opis toplotne prevodnosti, in enačb, ki opisujejo prenos gibalne količine in snovi z enodimenzionalno difuzijo. V vseh primerih je snovni oziroma energijski tok pro-

porcionalen gradientu ustrezne spremenljivke, koeficient proporcionalnosti pa je snovna lastnost.

Les je po svoji naravi higroskopnen celularni anizotropen kompozit z dokaj izrazito nehomogenostjo. Toplotna prevodnost lesa in lesnih kompozitov je nedvomno ena pomembnejših fizikalnih lastnosti tako s tehnološkega kakor tudi uporabnostnega vidika polproizvodov in končnih proizvodov. Zaradi specifične zgradbe in higroskopnosti lesa leta prevaja toploto tako, da teče del toplotnega toka skozi trdno snov, ki jo predstavlja celična skeletna struktura, del toplotnega toka pa gre skozi tekoči in plinski medij. Vpliv specifične strukture lesa v smeri temperaturnega gradienta ima pri prevajanju toplote nedvomno odločilno vlogo, kar se kaže tudi v analogiji med anizotropijo strukture usmerjenega tkiva in anizotropijo toplotne prevodnosti /2, 9/. V prečni smeri je toplotna prevodnost približno dva- do trikrat nižja od prevodnosti v vzdolžni smeri. Toplotna prevodnost lesa je v veliki meri odvisna tudi od vlažnosti lesa in njegove gostote v absolutno suhem stanju /2/. V obeh primerih gre za pozitivno in linearno odvisnost /2,12/, pri čemer pa izrazitost vpliva naraščajoče vlažnosti z naraščajočo izhodiščno gostoto blago narašča /2/.

S toplotno prevodnostjo lesa so se v preteklosti ukvarjali številni avtorji. Problematika toplotne prevodnosti lesa se je pogosto navezovala na problematiko stacionarne oziroma nestacionarne neizotermne difuzije vezane vode /4, 6, 7, 8, 10, 13/. Za modeliranje toplotne prevodnosti lesa so bile pogosto uporabljene enake metode kot za modeliranje difuzije vezane vode /3/, obstajajo pa tudi publikacije o vplivu izmerjenih vrednosti na zanesljivost modeliranja transporta toplote /5/. Večina podatkov o toplotni prevodnosti lesa je bila pridobljena z uporabo

klasične stacionarne eksperimentalne metode z vročo ploščo /10/. Vzorec mora biti izpostavljen toplotnemu toku iz vroče plošče toliko časa, da se v materialu vzpostavi linearni temperaturni gradient. Temperaturno razliko ustvarja toplotni ponor, ki je lahko okolica ali pa hlajena plošča, ki je v stiku z vzorcem. Ko se vzpostavi stalni temperaturni gradient, lahko vzorcju znane geometrije posredno določimo toplotno prevodnost. Za to potrebujemo zgolj stacionarno temperaturno razliko in količino dovedene električne energije, ki je potrebna za vzdrževanje temperature vroče plošče v stacionarnem stanju. Omenjena metoda je dokaj enostavna, vprašljiva pa je njena zanesljivost. Razloga za dvom o zanesljivosti omenjene metode sta dva, in sicer pojav kontaktne toplotne upornosti med ploščo in vzorcem ter pojav termodifuzijskega gradienta, ki je posledica Soretovega efekta /7,8,10/. Pojavi se namreč masni tok vlage v smeri padajočega temperaturnega gradienta, ki ni povezan z obstojem vlažnostnega oziroma koncentracijskega gradienta.

Toplotna prevodnost

Če predpostavimo, da je toplotni tok vektorska spremenljivka, ga lahko izrazimo v obliki /1/

$$q = -k\nabla T = -k \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

pri čemer pomeni k toplotno prevodnost snovi, ∇ je Hamiltonov operator, $T(x, y, z)$ pa je skalarno temperaturno polje. Enačba je popolni zapis Fourierjevega zakona in velja za poljuben koordinatni sistem. Enačba pove, da je toplotni tok proporcionalen temperaturnemu gradientu, vendar nasprotno usmerjen. Iz enačbe izhaja tudi dejstvo, da je vektor toplotnega toka pravokoten na izoterme temperaturnega polja. V primeru, ko imamo opravka z enoosnim toplotnim tokom skozi dolo-

čeno snov, lahko zapišemo Fourierjev zakon v obliki

$$q_x = -k \frac{dT}{dx}. \quad (2)$$

Če zgornjo enačbo, ki predstavlja enoosni toplotni tok, pomnožimo s karakteristično presečno površino materiala A , skozi katero tok teče, dobimo zvezo, ki izraža količino toplote, ki se v enoti časa prenese skozi material. Ker je toplota Q skalarna spremenljivka, postane predznak irelevanten in lahko zapišemo

$$Q = k \cdot A \frac{dT}{dx}. \quad (3)$$

Ko je v materialu s konstantno toplotno prevodnostjo k in s karakteristično dimenzijo L doseženo stacionarno stanje brez notranje generacije toplote, je temperaturni gradient linearen. Če to v enačbi 3 upoštevamo in jo še nekoliko prilagodimo, jo lahko uporabimo kot izraz za toplotno upornost R_{kond} in sicer v obliki

$$R_{kond} \equiv \frac{\Delta T}{Q} = \frac{L}{k \cdot A}. \quad (4)$$

Toplotna upornost snovi je torej odvisna od specifične toplotne upornosti, ki pomeni recipročno vrednost toplotne prevodnosti k , presečne površine, skozi katero naj bi se vzpostavil toplotni tok, in dimenzije preizkušanca v smeri gradienta L .

Če imamo opravka z večjim številom preizkušancev, ki so običajno sestavljeni tako, da tvorijo paralelno oziroma serijsko nevezano kompozitno strukturo, je poleg osnovnih toplotnih upornosti treba upoštevati še dodatne tako imenovane kontaktne toplotne upore, ki nastanejo na stičnih površinah. Kontaktni toplotni upori so posledica morfoloških značilnosti stikajočih se površin, le-te pa vplivajo na razmerje med realno in nominalno stično površino. Za kontaktno toplotno upornost

je poleg geometrijskih značilnosti površin zelo pomembna tudi deformabilnost materialov, ki je določena z izborom materialov, ter normalne površinske obremenitve. Naraščajoče normalne obremenitve in deformabilnost sodelujočih struktur znižujejo kontaktni toplotni upor.

Podobno kot v električnih tokokrogih, lahko tudi v toplotnih tokokrogih upore skladno z načinom njihove vezave enostavno seštevamo. V primeru stacionarne metode za določanje toplotne prevodnosti materialov imamo potemtakem poleg osnovne toplotne upornosti R_{kond} še dva kontaktna toplotna upora R_k , ki sta lahko enaka ali pa tudi različna. S slednjim primerom imamo opraviti tedaj, kadar imamo na eni površini vzorca konduktivni, na drugi površini pa konvektivni prehod toplotnega toka. Dodatni kontaktni toplotni upori se pojavijo tudi v primeru nevezanih slojevitih kompozitov. Če predpostavimo, da sta na obeh stičnih površinah kontaktna toplotna upora enaka in da je v slojevitem kompozitu enako debelih lamel enakega materiala, lahko celotni toplotni upor zapišemo v obliki

$$R_c = nR_{kond} + (n-1)R_s + 2R_k \quad (5)$$

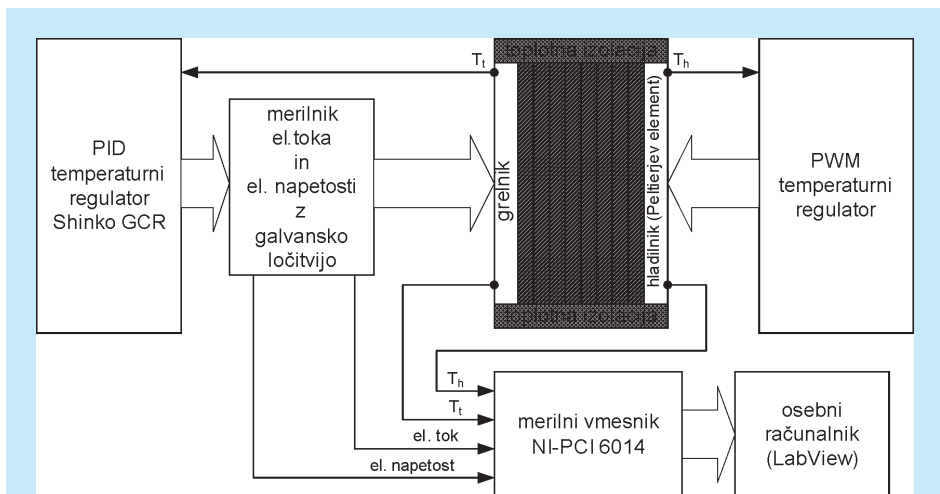
pri čemer je kontaktni toplotni upor med dvema lamelama. Ker so notranji kontaktni upori običajno zelo majhni, jih lahko zanemarimo /11/ in izrazimo celotni toplotni upor v obliki

$$R_c = nR_{kond} + 2R_k \quad (6)$$

Iz enačbe je razvidno, da lahko določimo osnovni toplotni upor in s tem tudi toplotno prevodnost preskušane materiala zgolj v primeru, ko poznamo kontaktni toplotni upor na stičnih površinah.

Material in metoda

Vzorci dimenzije 60 mm x 50 mm x 0,5 mm smo izdelali iz rezanega javorjevega furnirja (*Acer pseudoplatanus*)



□ Slika 1. Shematski prikaz eksperimentalnega sistema

debeline 0,5 mm. Uravnovesili smo jih v klimi nad nasičeno raztopino NaNO_3 pri temperaturi 22 °C. Po uravnovešanju smo vse lističe oziroma lamele stehali. Izvedli smo dva različna eksperimenta, ki sta potekala v enakih pogojih. V prvem eksperimentu, ki smo ga izvedli z namenom, da bi določili temperaturni in vlažnostni gradient, smo v napravo za določanje toplotne prevodnosti vstavili hkrati serijo osmih lističev. Med lističe smo namestili termočlene tipa E, ki so omogočili kasnejše spremljanje temperaturnega gradienta. Celotni sistem smo vlažnostno izolirali tako, da masna izmenjava med vzorcem in okolico ni bila možna. Po zaključku eksperimenta smo vsem lističem določili vlažnost. V drugem eksperimentu pa smo vstavljali lističe med grelno in hladilno ploščo eksperimentalne naprave postopno. Po vsaki vstavitvi novega lističa smo počakali, da se je vzpostavilo stacionarno stanje, nato pa smo pričeli z merjenjem moči, ki je bila potrebna za vzdrževanje stanja. Meritve električne moči v stacionarnem stanju vzorca so trajale poljubno dolgo. Med eksperimentom sta bili temperaturi plošč ves čas enaki, in sicer je imela grelna plošča temperaturo 45 °C, hladilna plošča pa 15 °C.

Shematsko je eksperimentalna naprava prikazana na sliki 1. Naprava za

merjenje toplotne prevodnosti je sestavljena iz dveh ločenih sistemov, in sicer grelnega sistema na eni in hladilnega sistema na drugi strani. Za gretje sistema smo uporabili 100 W uporovni grelnik, za hlajenje pa 50 W Peltierjev element. Temperaturi obeh sistemov sta bili izpostavljeni ločenima regulacijskima sistemoma. Temperatura grelne plošče je bila izpostavljena regulaciji, ki smo jo izvedli s PID regulatorjem Shinko GCR, temperatura hladilne plošče pa impulzno širinski regulaciji. Toplotno moč določamo posredno z meritvijo toka in napetosti grelnega elementa. Za zajem vseh potrebnih parametrov smo uporabili osebni računalnik z vgrajeno merilno kartico National Instruments NI-PCI 6014 in programsko opremo LabView.

Rezultati in razprava

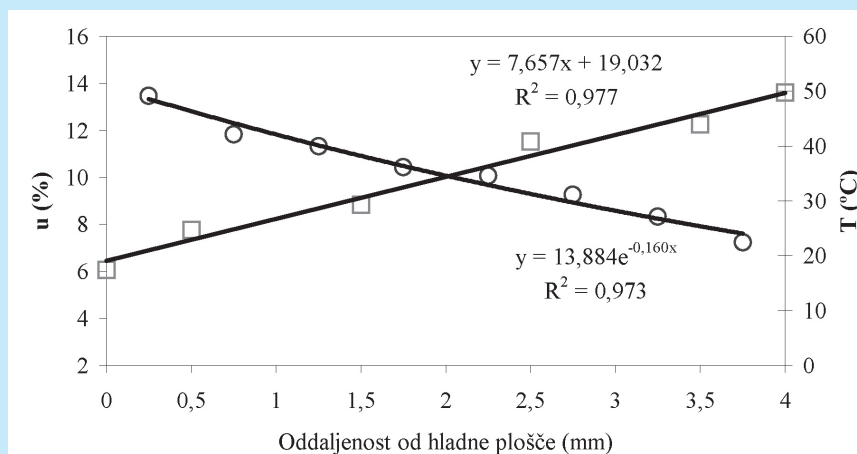
Potek stacionarnega temperaturnega in vlažnostnega gradienta v nevezanem slojevitem kompozitu je prikazan na sliki 2. Temperaturni gradient je linearen, vlažnostni pa eksponenten. Vlažnostni gradient je izključno posledica termodifuzije oziroma Soretovega efekta, le-ta pa se pojavi ob formiranju temperaturnega gradienta. Stacionarni temperaturni gradient pomeni, da teče skozi serijo preizkušancev konstanten toplotni tok, ki ga dovajamo z grelnim

telesom. Stacionarni vlažnostni gradient pa v našem primeru, ko je sistem vlažnostno izoliran, pomeni stanje brez masnega toka. Obstoje gradienta, ki pomeni prerazporeditev vlage, to pomeni, da postane začetna vlažnost povprečna, je možen zgolj zaradi energijsko uravnovešene porazdelitve vlage in temperature. S povečevanjem vlažnosti se toplotna prevodnost lesa dejansko linearno povečuje /2,12/, povprečna toplotna prevodnost pa ostane nespremenjena. To pomeni, da pojav vlažnostnega gradienta v zaprtem sistemu ne vpliva na spremembo skupnega toplotnega upora.

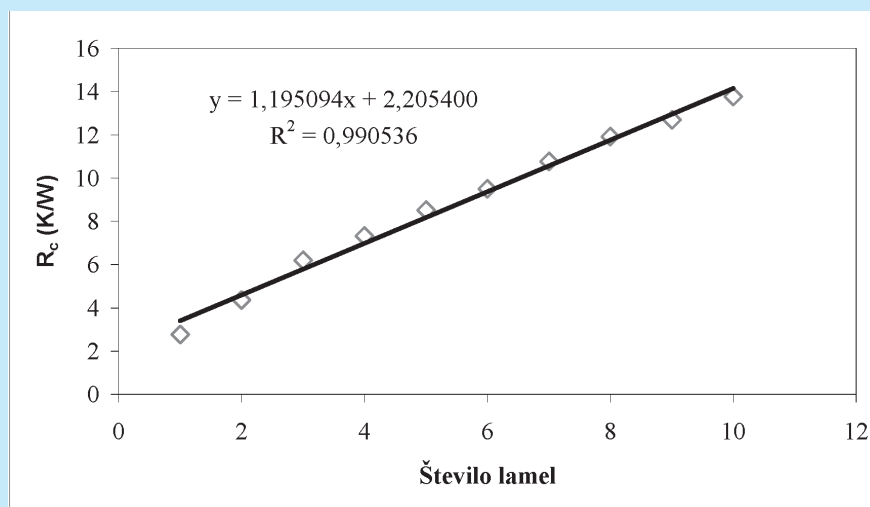
Ovisnost med skupnim toplotnim uporom in številom lamel je prikazana na sliki 3. Če v enačbo 6 vnesemo vrednosti iz enačbe regresijske premice, dobimo za in vrednosti 1,195 oziroma 1,103 k/W. Iz vrednosti za lahko z upoštevanjem enačbe 4 izračunamo vrednost za toplotno prevodnost, ki znaša v našem primeru 0,139 W/m.K.

Teoretično bi za izračun obeh toplotnih uporov zadoščali že dve meritvi na preizkušancih dveh različnih debelin, pri čemer naj bi bili normalna obremenitev in pa morfologija stičnih površin preizkušanca v obeh primerih enaki. Ker je dejansko potrebno število meritev oziroma debelin materiala odvisno od zelene zanesljivosti in variabilnosti izmerjenih vrednosti posameznih meritev, je smiselno, da ga določimo za vsak primer posebej.

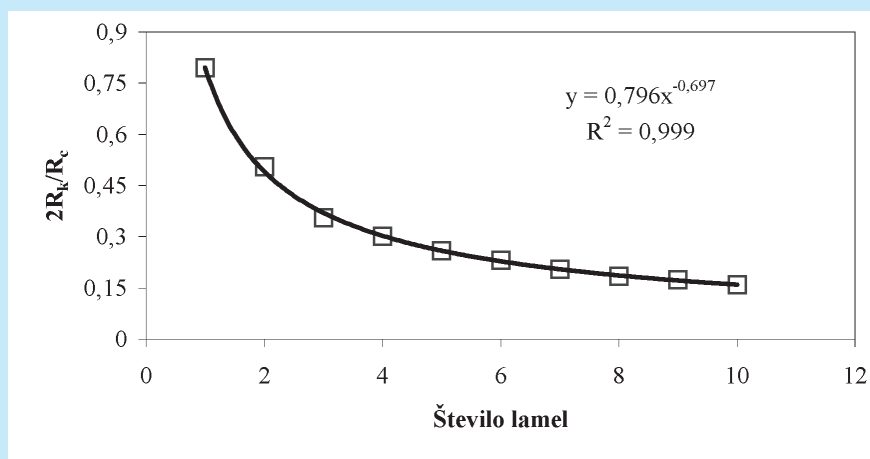
Na sliki 4 je prikazano razmerje med kontaktnim toplotnim uporom ter celotno izmerjeno toplotno upornostjo. Z naraščajočim številom lamel oziroma skupno debelino preizkušanca delež kontaktne toplotne upornosti dokaj hitro pada. Če bi želeli, da bi v našem primeru padel delež kontaktne toplotne upornosti pod 5 %, bi moral biti preizkušanec sestavljen iz 54 lamel, kar pomeni skupno debelino 27 mm.



□ Slika 2. Porazdelitev temperature (□) in vlažnosti (○) v preizkušancu, v odvisnosti od oddaljenosti od hladne plošče



□ Slika 3. Celotna toplotna upornost v odvisnosti od števila lamel



□ Slika 4. Delež kontaktne upornosti v odvisnosti od števila lamel

Sklep

Prikazana je analiza vpliva kontaktne toplotne upornosti na toplotno prevodnost slojevitnega nevezanega masivnega lesnega kompozita. Uporaba stacionarne metode določanja enoosne toplotne prevodnosti prečno orientiranega lesnega tkiva je smiselna zgolj v primeru, ko poznamo kontaktne toplotne upore, ki so posledica morfoloških značilnost stičnih površin. Določimo jih lahko samo v primeru, ko poznamo zvezo med debelino oziroma karakteristično dimenzijo preizkušanca v smeri temperaturnega gradienta kot neodvisno ter skupnim toplotnim uporom kot odvisno spremenljivko. Med posameznimi meritvami naj bi normalne obremenitve in pa morfološke značilnosti stičnih površin ostale kar se da nespremenjene. Med eksperimentom se v slojevitnem preizkušancu pojavi vlažnostni gradient, ki je posledica termo-difuzije, le-ta pa je posledica temperaturnega gradienta. □

literatura

1. **Incropera, F.P.; De Witt, D.P. 1990.** Fundamentals of heat and mass transfer. Third edition. John Wiley and Sons, 919 str.
2. **Kollmann, F.F.P.; Côté, W.A. 1984.** Principles of wood science and technology. Solid wood. Springer - Verlag, 591 str.
3. **Khattabi, A.; Steinhagen, P. 1993.** Analysis of transient nonlinear heat conduction in wood using finite-difference solutions. Holz als Roh- und Werkstoff 51 (4), 272-278
4. **Kisseloff, P. 1969.** Feuchtigkeitsbewegung und Wärmeleitung in Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 27 (7), 245-253
5. **Olek, W.; Weres, J.; Guzenda, R. 2003.** Effects of thermal conductivity data on accuracy of modeling heat transfer in wood. Holzforschung 57 (3), 317-325
6. **Peralta, P.N.; Skaar C. 1993.** Experiments on steady-state nonisothermal moisture movement in wood. Wood and Fiber Science, 25 (2), 124-135
7. **Siau, J.F.; Babiak, M. 1983.** Experiments on nonisothermal moisture movement in wood. Wood and Fiber Science, 15 (1), 40-46
8. **Siau, J.F.; Bao, F.; Avramidis, S. 1986.** Experiments on nonisothermal diffusion of moisture in wood. Wood and Fiber Science, 18 (1), 84-89
9. **Siau, J.F. 1995.** Wood: Influence of moisture on physical properties. Department of wood science and forest products. Virginia Polytechnic Institute and State University, 227 str.
10. **Suleiman, B.M.; Larfeldt, J.; Leckner, B.; Gustavsson, M. 1999.** Thermal conductivity and diffusivity of wood. Wood Science and Technology 33, (6), 465 - 473
11. **Šega, B. 2002.** Vpliv lepilnega spoja na prečno difuzijo vodne pare, Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 104 str.
12. www.acadjournal.com/
13. **Quarles S.L.; Erickson, R.W. 1990.** Examples of nonisothermal moisture movement in wood. Wood and Fiber Science, 22 (3), 314-325

Novosti iz zastopniškega programa Lesnina inženiring d.d. Ljubljana - stroj za spajanje furnirja KUPER FL/Rapid

Firma KUPER iz Rietberga je specializirana za vse vrste strojev za obdelavo furnirja, za stroje za embalaranje s folijo in štiristranske skobeljne stroje.



Na letošnjem sejmu **Ligna v Hannoveru 02.- 06.05.2005** bo Kuper predstavil novost – **FL / Rapid** za spajanje furnirjev, ki so predhodno premazani z lepilom.

Pri nadaljnji obdelavi so furnirji velikokrat izpostavljeni visokim temperaturam in nateznim obremenitvam (npr. v tehnologiji membranskega oplasčanja). Za ta namen je najprimernejša uporaba **sečninsko formaldehidnega lepila**. Pri tovrstnem spajanju furnirjev je potrebno istočasno dovajanje toplote in pritisk vzdolž daljše transportne poti. Stroj FL/Rapid je opremljen s transportno verigo, ki transportira obdelovanec in ga istočasno ogre-

va. Namenjen je za spajanje furnirjev debeline 0,3 – 1,2 mm in širine od 45 mm naprej in ima možnost zelo natančnega nastavljanja pritiska in hitrosti pomika glede na vrsto furnirja. Kuprov patent in absolutna novost na tržišču je **vstavljanje ozkih vzdolžnih trakov furnirja** med dva širša kosa furnirja, s čimer lahko zelo popestrimo sliko spojenih furnirjev in ustvarimo razne vzorce.

HEINRICH KUPER GmbH & Co. KG
Bruchstraße 13 – 19
DE-33397 Rietberg
<http://www.kuper.de>

Generalni zastopnik:
LESNINA INŽENIRING d.d.
Parmova 53, 1000 Ljubljana
□ tel.: 01/4720-667, -632,
faks: 01/436 2191
e-mail: lesnina.zastopstva@siol.net
www.lesnina-inzeniring.com