

UDK: 674.047

Оригинални научни рад

DOI: 10.2298/GSF1614119M

АНАЛИЗА МЕХАНОСОРПЦИОНОГ ЕФЕКТА ПРИ ОСЦИЛАТОРНОМ СУШЕЊУ РЕЗАНЕ ГРАЂЕ БУКВЕ

др Горан Милић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Шумарски факултет (goran.milic@sfb.bg.ac.rs)
др Небојша Тодоровић, доцент, Универзитет у Београду – Шумарски факултет

Извод: У раду су приказани резултати анализе утицаја осцилирајућих параметара сушења на мерење влажности дрвета у сушари, брзину и квалитет сушења. За анализу су коришћени конвенционални циклус сушења, циклус са осцилацијама равнотежне влажности и циклус са осцилацијама температуре. За задавање и остварење осцилација креиран је посебан софтверски додаток. Показано је да осцилације и равнотежне влажности и температуре доводе до цикличних промена влажности дрвета, али и до додатне непрецизности мерења влажности у сушари. Сушење шарже са осцилацијама равнотежне влажности је трајало нешто краће у односу на друге две шарже. Квалитет сушења је био исти или бољи у шаржама са осцилацијама у односу на конвенционалну шаржу, а мања напрезања у дрвету су потврдила активирање додатног механосорпционог ефекта током цикличних промена влажности у површинским слојевима.

Кључне речи: механосорпциони ефекат, осцилаторно сушење, резана грађа букве, квалитет сушења

УВОД И ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

Стални су напори у дрвној индустрији да се дође до оптималног начина сушења резане грађе, односно да се постигне што бољи квалитет сушења уз што краће време. Због утезања дрвета и напона које тај процес изазива, важну улогу при самом сушењу дрвета има појава течења - тежња чврстог материјала да врло полако клиза или се трајно деформише под дејством одређеног, дуготрајног оптерећења. Деформације течења при сушењу се јављају као последица унутрашњих напрезања изазваних утезањем дрвета, односно утезање дрвета изазива напоне који су еквивалент онима које изазива оптерећење у уобичајеној анализи течења. Деформације течења релаксирају постојећа напрезања и тако смањују могућност

настанка пукотина. Ове деформације зависе од услова средине и веће су у условима високе температуре и релативне влажности. То је један од разлога зашто брзина код високотемпературног сушења може бити виша него код нискотемпературног, а ипак произвести мање пукотина (*Hanhijärvi 2007*).

Два су основна дела механизма течења при сушењу: вискоеластични и механосорпциони (Сл. 1). Промена влажности у дрвету, при чему је оно већ изложено одређеном напону, доводи до повећања деформација течења – феномена познатог под именом механосорпционо течење или механосорпциони ефекат. Овај ефекат је врло важан за процес сушења дрвета, јер је та деформација при сушењу обично

већа од деформације изазване вискоеластичним течењем (*Moutee et al. 2010*). Ови аутори су испитивали дејство наизменичног влажења и сушења на величину механосорпционе деформације. Утврђено је да је механосорпционо течење веће током првог циклуса сорпције него код наредних циклуса, као и да прва сорпција, без обзира да ли се дрво влажи или суши, доводи до пораста течења.

Треба истаћи да се наизменично влажење и сушење дрвета у одређеној мери догађа у свакој конвенционалној сушари као последица реверзибилне циркулације ваздуха, односно промена смера кретања ваздуха на сваких неколико сати. Промена смера кретања доводи до постојања осцилација параметара ваздуха на местима где ваздух улази у слојаје. Први ред слојаја, који је изложен најоштријим условима, по измени смера циркулације постаје последњи, односно бива изложен најблажим условима сушења. Новом променом смера по-

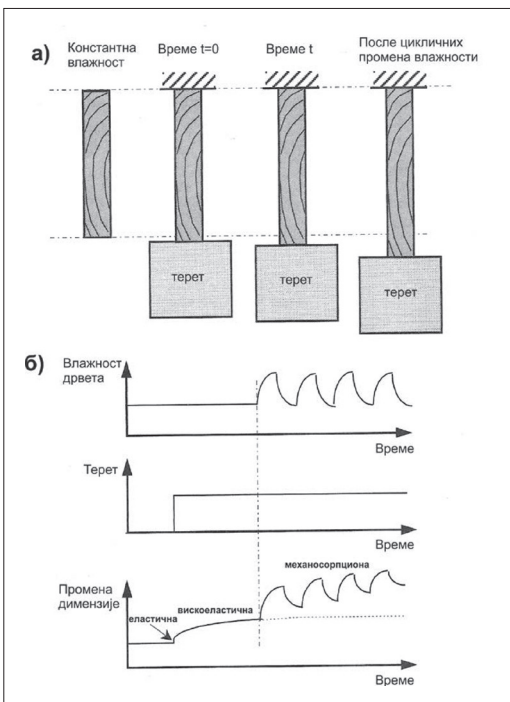
ново се мењају и параметри. Амплитуда осцилација опада са снижавањем влажности дрвета у сушари, јер мања количина воде испарава и мења параметре ваздуха (*Riehl, Welling 2003*). Независно од ових већ постојећих и неконтролисаних осцилација, било је много покушаја да се у конвенционално сушење уведу принудне, контролисане осцилације параметара ваздуха у дефинисаним временским интервалима – тзв. осцилаторно сушење (*Langrish et al. 1992, Terziev et al. 2002, Sackey et al. 2004, De La Cruz-Lefevre et al. 2009*). Циљ је углавном био да се поспешивањем механосорпционог ефекта добије бољи квалитет сушења (мања напрезања у дрвету), али су резултати неких од ових истраживања контрадикторни и често непримениви у индустријским сушарама.

Циљ овог рада је утврђивање утицаја осцилација температуре или равнотежне влажности на мерење влажности дрвета у сушари и брзину сушења. Циљ је и утврдити како цикличне промене влажности дрвета (појачано механосорпционо течење) утичу на коначни квалитет сушења посматран кроз коначну влажност, градијент влажности по дебљини грађе и скорелост.

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД

Испитивање је вршено на непареној резаној грађи букве (*Fagus sylvatica L.*) дебљине 38 mm и дужине 2,1 m. Укупно је осушено 12 шаржи (*Milić et al. 2013, Milić et al. 2014*), а у овом раду биће детаљно анализирани три (Табела 1): једна конвенционална, једна са осцилацијама равнотежне влажности (амплитуда 20%, трајање фаза 3 часа) и једна са осцилацијама температуре (амплитуда 10%, трајање фаза 3 часа). У све три шарже је сушена сирова грађа, а циљана коначна влажност је износила 8%.

Сушење грађе је вршено у конвенционалној сушари капацитета 0,8 m³ (сложај 2,1 m x 0,7 m x 0,9 m), опремљеној са два аксијална вентилатора (d=500 mm, P=0,37 kW), четири вентилациона отвора (два усисна и два одсисна), системом за навлаживање ваздуха хладном водом и два мерна места за мерење температуре и равнотежне влажности. У сушари се



Слика 1. Вискоеластично и механосорпционо реаковање дрвета а) уобичајена експериментална процедура, б) шематски приказ реакције дрвета (према Perré 2007)

Табела 1. Режим сушења (буква, 38 mm)

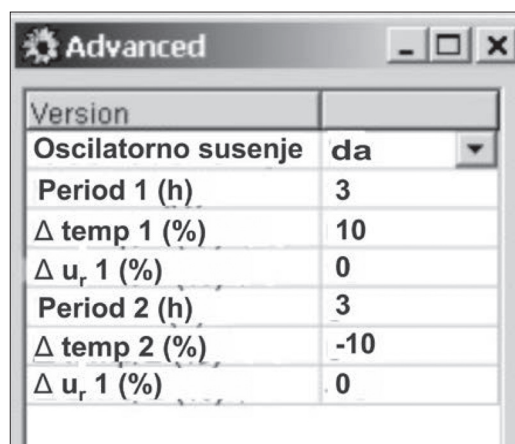
Влажност (%)	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Температура (°C)	37	38	38	38	38	40	43	47	52	58	62	62
Равнотежна влажност (%)	15	15	14.6	14.0	13.6	13.1	12.1	9.2	6.8	5.4	4.4	3.9

налази осам сонди за мерење влажности дрвета и четири сонде које могу мерити температуру у дрвету. За сушење шаржи са осцилацијама морао се активирати претходно креиран додаток (Сл. 2) који је постао стандардно решење у софтверу „Dry Manage“ произвођача Нигос-електроник. Аутоматски, основни избор је да је опција Осцилаторно сушење искључена како не би збуњивала мање искусне кориснике. Када се активира, задају се трајање прве и друге фазе (Период 1 и 2), тј. фреквенција у часовима, а амплитуде температуре и равнотежне влажности у процентима у односу на, режимом за тај тренутак, предвиђену вредност. Изабрано је да се амплитуде задају на овај начин како би њихова величина била прилагођена фази у којој се процес сушења налази. Уколико би се, нарочито у случају равнотежне влажности, амплитуде задавале у апсолутним процентима влажности оне би биле у одређеном делу процеса или премале или превелике. Тако, амплитуда осцилација од 2% у апсолутном смислу би, на почетку сушења када је режимом предвиђена вредност равнотежне влажности око 15%, давала вредности од 13% и 17%, али би при крају процеса, за предвиђену равнотежну влажност од око 5%, те вредности износиле 3% и 7%. Ово последње је превелика разлика са неколико аспеката. Прво, сушаре тешко технички достижу овако ниску вредност равнотежне влажности (3% и мање) уз проблем тачности мерења овако ниских вредности влажности, сама разлика у условима климе је велика (за равнотежну влажност 3 и 7% при температури од 60°C релативна влажност износи 17% односно 47%) и коначно, теоријска анализа показује да утицај осцилација у овој фази сушења није велики (Salin 2003), па нема потребе за овако високим амплитудама које оптерећују систем. Изабрани начин омогућује да

се амплитуде задају у процентима у релативном смислу. Ово значи да уколико се изабере амплитуда равнотежне влажности од $\pm 10\%$, она ће за горе наведен пример на почетку сушења давати вредности од 13.5% и 16.5%, а на крају процеса 4.5% и 5.5%. Слична анализа важи и за предности задавања амплитуда температуре у процентима у односу на амплитуде у °C.

Анализиран је утицај осцилација на тачност мерења влажности у сушари (у шаржи са осцилацијама равнотежне влажности је мерење сонди у сушари поређено са гравиметријским одређивањем влажности), утицај на брзину сушења и на квалитет сушења. Анализиран је и проблем моделовања механосорпционог ефекта у условима осцилирања параметара ваздуха односно влажности дрвета, а у односу на уобичајене услове при конвенционалном сушењу.

Узорковање је у свим шаржама вршено на по 30 дасака из централног дела сложаја. Гравиметријски је одређивана почетна и коначна



Слика 2. Параметри осцилација у додатку софтвера

влажност. Градијент влажности по дебљини грађе је израчунаван на основу гравиметријски добијане влажности на пет ламела изрезаних по дебљини грађе. Скорелост је утврђивана мерењем размака (СРПС ЕНВ 14464). За анализу коначне влажности, осим стандарда СРПС ЕН 14298, коришћени су и статистички параметри који се могу користити за коначну оцену квалитета сушења - стандардна девијација, коефицијент варијације (k_v) и релативна дисперзија (RD):

$$k_v = \frac{\sigma}{u_k} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$RD = \frac{\Delta u}{u_k}$$

где је:

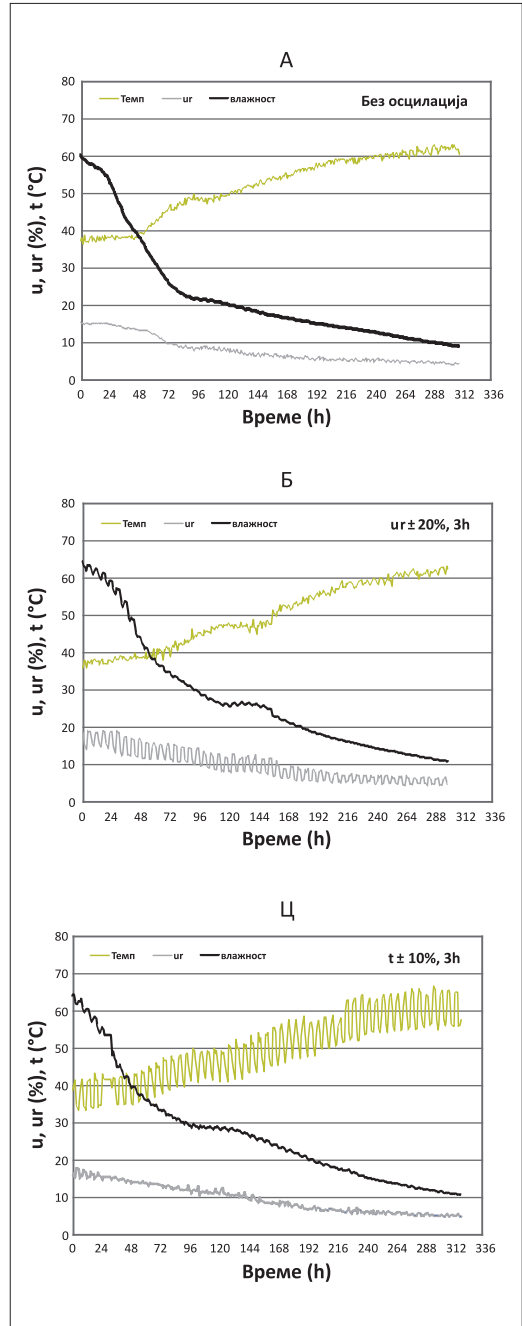
σ – стандардна девијација,
 u_k – средња вредност коначне влажности (%).
 Δu – разлика између максималне и минималне очитане вредности (%),

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Почетна влажност (одређено гравиметријски) је код све три шарже износила више од 80%, односно радило се о потпуно сировој грађи што је последица кратког времена од обраћања стабала до допремања грађе на сушење. Очекивано, почетна влажност мерено сондама у сушари била је нижа (Сл. 3). Трајање активне фазе сушења је код шарже без осцилација износило 308 h, код шарже са осцилацијама равнотежне влажности 300 h, а код шарже са осцилацијама температуре 316 h.

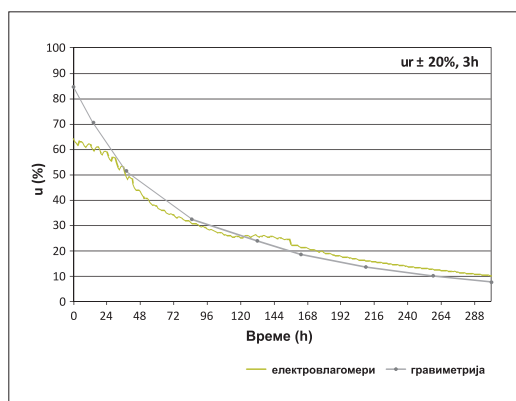
Утицај осцилација на мерење влажности

У шаржама са осцилацијама, нарочито при осцилацијама равнотежне влажности је приметан утицај наглих промена параметара на измерене вредности влажности грађе. У периодима где равнотежна влажност (тима и релативна влажност) расте веће су измерене влажности дрвета и обрнуто. Варијације влажности



Слика 3. Криве сушења и вредности температуре и равнотежне влажности (конвенционална шаржа, шаржа са осцилацијама равнотежне влажности, шаржа са осцилацијама температуре)

су веће у подручју изнад 45% и крећу се до $\pm 1,5\%$, а касније се смањују и испод 20% влажности су занемарљиве. Први узрок ове појаве је тзв. ефекат психрометра. При влажности грађе значајно изнад границе хигроскопности, површина дасака се понаша као мокри термометар. Интензивно испаравање влаге са површине доводи до хлађења дрвета, односно температуре у дрвету је нижа од температуре ваздуха у сушари, тј. температуре сувог термометра. Разлика је утолико већа што је релативна влажност ваздуха, а самим тим и равнотежна влажност, нижа. При мерењу влажности грађе врши се компензација температуре и то према температури ваздуха. Последица је да аутоматика у овом случају региструје нижу вредност влажности дрвета од реалне, јер се корекција врши у односу на вишу температуру. Наравно да током овог периода долази и до реалног снижавања влажности. Код наредног периода у којој се равнотежна влажност повећава, расте и релативна влажност ваздуха, испаравање са површине дрвета је врло мало (или чак долази до благог адсорбовања влаге из ваздуха), па готово да нема разлике између температуре дрвета и ваздуха што се манифестује скоком измерене влажности дрвета у односу на вредности у претходном периоду. У каснијем току сушења је испаравање воде са површине дрвета значајно мање, па је и ефекат психрометра све мањи.



Слика 4. Криве сушења мерење електровлагомера и одређивано гравиметријски (ша-ржа са осцилацијама равнотежне влажности)

Други узрок ове појаве је недовољна поузданост компензације температуре у подручјима високе влажности дрвета. Поред увек присутне непрецизности електровлагомера у подручју изнад границе хигроскопности, додатан проблем је што у том подручју и мала промена температуре доводи до значајне промене у сигналу на основу ког се одређује влажност. Ипак, с обзиром да је стварна влажност дрвета у подручју изнад 30% најчешће виша од оне коју мере електровлагомери (Сл. 4), јасно је да забележене варијације у мерењу немају велики утицај на брзину сушења.

И код шарже где су вршене осцилације температуре долази до варијација измерених влажности као последица различите температуре дрвета и околног ваздуха и непоузданости компензације овог параметра у подручју високе влажности дрвета. Варијације влажности и у овом случају су до $\pm 1,5\%$, и постепено се смањују како сушење одмиче. У овом случају су реалнија мерења влажности у периодима ниже температуре (на почетку процеса око 34°C), јер је тада температура ваздуха приближнија температури дрвета. Са друге стране, при преласку у период више температуре (на почетку процеса то је око 41°C), ваздух релативно брзо достиже задату температуру, што није случај са дрветом па су и мерења влажности нереалнија. И у овом случају варијације у мерењу влажности не утичу на реалну брзину сушења.

Утицај осцилација на брзину сушења

Код шарже са осцилацијама равнотежне влажности је брзина сушења била већа него код конвенционалне, а примарни узрок би могао бити повећан градијент влажности у периодима ниске равнотежне влажности - услед повећаног испаравања влаге са површине дрвета. Као и код сушења без осцилација, и у овом случају се одвојено могу посматрати две фазе сушења: прва, када брзина сушења зависи само од спољашњих услова, односно када је линија испаравања на површини или близу површине дрвета и друга, када се линија испаравања помера ка унутрашњости, а брзина сушења зависи првенствено од дифузије. Током прве, релативно кратке фазе површина

дрвета је још увек имала влажност изнад тачке засићености влаканаца због чега је притисак водене паре био једнак притиску засићења, односно функција је једино температуре површине. Температура површине дрвета је једнака температури мокрог термометра, а топлота коју ваздух предаје дрвету троши се само на испаравање воде која капиларним кретањем долази из унутрашњих слојева. Снижавање релативне влажности ваздуха у периоду ниске равнотежне влажности значи и већу брзину испаравања, јер се повећава разлика у притиску водене паре на површини и у ваздуху. Већа брзина испаравања подразумева и већу психрометарску разлику, односно нижу температуру мокрог термометра (површине дрвета). Како влажност дрвета постепено опада, при истом градијенту влажности, интензитет кретања слободне воде се смањује због смањења пермеабилности. Постоји могућност да се периодима ниске равнотежне влажности, због повећаног градијента влажности успорава ово смањење интензитета кретања слободне воде. Током друге фазе сушења, када су површински слојеви у хигроскопном подручју влажности, ниска равнотежна влажност такође повећава брзину кретања воде, али сада кроз следеће утицаје: брзина дифузије је већа, јер је разлика између концентрације влаге у унутрашњим и површинским слојевима повећана; површински слојеви се, због губитка воде, утежу и тиме је пут који вода треба да пређе од унутрашњих слојева до границе испаравања скраћен.

Током периода високе равнотежне влажности јављају се супротни ефекти. Мања је брзина испаравања од које зависи брзина сушења на почетку процеса, јер је разлика притиска водене паре на површини дрвета и у ваздуху мања. У каснијим стадијумима сушења, површински слојеви примају влагу из ваздуха током

ове фазе, повећавају своју влажност чиме се донекле заустављају претходно наведени позитивни ефекти. Периодичност осцилација доводи и до понављања позитивних и негативних ефеката, али због тога што влажност дрвета укупно посматрано опада, доминантан је позитиван утицај. На ово треба додати и утицај “ефекта психрометра” (нарочито на почетку сушења) због кога је измерена влажност грађе у периодима ниске равнотежне влажности нижа од реалне, док је у периодима високе равнотежне влажности у нивоу реалне. При сушењу са осцилацијама равнотежне влажности је дакле, измерена влажност грађе у просеку нешто нижа него код конвенционалног, па су и услови сушења нешто оштрији.

Брзина сушења у шаржи са осцилацијама температуре је нешто нижа, што потврђује неке наводе из литературе (*Salin 2003*) да је ефекат температурних осцилација мали у поређењу са осцилацијама релативне влажности ваздуха.

Утицај осцилација на квалитет сушења

Коначна влажност (Табела 2) код све три шарже испуњава услов прописан стандардом СРПС ЕН 14298: у границама $-1/+1\%$ од жељене коначне влажности и $93,5\%$ дасака у опсегу $(0,7 \div 1,3) \cdot \text{ук}$. Уколико се у разматрање додатно уведу и неки статистички параметри, као коефицијент варијације (k_v) и релативна дисперзија (RD), све три шарже задовољавају тзв. добар квалитет сушења (према *Guzenda et al. 2002*), односно имају коефицијент варијације испод 20% и релативну дисперзију испод $0,8$ (Табела 2). Може се закључити да по овом основу, као и ако се посматра градијент влажности по дебљини грађе, квалитет шаржи са осцилацијама није лошији од конвенционалне шарже. Гради-

Табела 2. Коначна влажност и градијент влажности

Шаржа	Без осцилација	ur $\pm 20\%$, 3 h	t $\pm 10\%$, 3 h
Коначна влажност (%)	7,4	7,8	7,6
Коеф. варијације (%)	12,6	11,0	10,9
Релативна дисперзија	0,57	0,50	0,40
Градијент влажности (%/cm)	1,5 (0,5)	1,5 (0,5)	1,2 (0,3)

Стандардна девијација у загради

јент влажности код шарже са осцилацијама температуре је нижи (статистички значајна разлика), али је ова шаржа нешто дуже и трајала од преостале две.

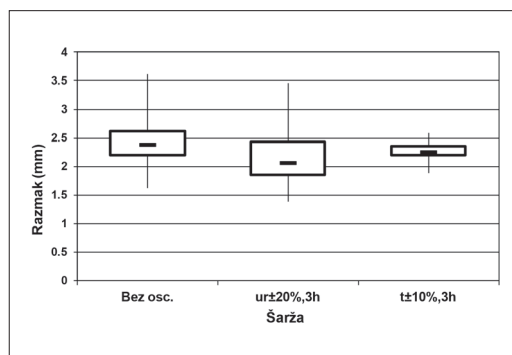
Величина скорелости грађе после активне фазе сушења је мерена и изражавана преко вредности размака, како то прописује стандард СРПС ЕНВ 14464. На Слици 5 су приказани минимум, максимум, медијана и први и трећи квантил за вредности размака мерене после 48 часова климатизовања у собним условима.

Просечне вредности размака су у шаржама са осцилацијама равнотежне влажности (2,2 mm) и осцилацијама температуре (2,3 mm) ниже у односу на шаржу без осцилација (2,5 mm). Овим се потврђује претпоставка да осцилације равнотежне влажности изазивају додатни механосорпциони ефекат који доприноси релаксацији напрезања у дрвету током сушења. Механосорпционо течење се јавља када површински слојеви дрвета уђу у хигроскопно подручје влажности, односно када су под напоном на затезање. Како је то течење усмерено у правцу и смеру деловања напона, то ће се јавити додатна деформација која доприноси релаксацији напона. Релаксација напона омогућава бољи квалитет сушења на крају процеса, или, као алтернативу, поштравање режима уз квалитет сушења као у конвенционалним шаржама. Може се претпоставити да више амплитуде изазивају снажнију механосорпцију, а тиме и, до одређене границе, смањење напрезања. У површинским слојевима дрвета се, услед цикличне промене влажности, јавља механосорпциони ефекат. То континуирано варирање равнотежне влажности изазива додатну деформацију површинских слојева, која се не може приписати еластичној, компоненти слободног утезања и вискоеластичној компоненти које се јављају при константој влажности (Muszynski et al. 2005).

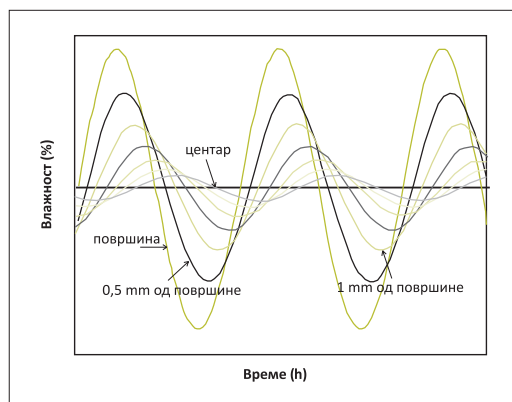
Битно је истаћи да утицај промене климе на дрво није тренутан, већ постоји одређено кашњење које се повећава са повећањем удаљености одређеног слоја дрвета од површине. Утицај осцилација опада како се иде ка центру дрвета и може се констатовати да у самом центру он и нема ефекта, односно нема промене влажности у центру дрвета која је директна последица осциловања равнотежне влажно-

сти. Са друге стране, површински слој у дебљини 0-300 μm врло брзо достиже равнотежну влажност (Rosenskilde 2002). Могуће је претпоставити (Сл. 6), али су потребна испитивања на микронивоу како би се прецизно утврдио механизам кретања воде током одређене фазе и након ње.

Иако као феномен познат већ више од пола века, механосорпциони ефекат није потпуно објашњен. Могуће објашњење механосорпционог понашања дрвета понудили су Hoffmeyer i Davidson (1989) који су узрок видели у настанку микропукотина у ћелијском зиду, тзв. клизних равни (slip plane). Појављује се одређени угао између клизних равни и лонгитудиналног правца слоја C2 ћелијског зида, дакле постоји тежња да се микрофидрили орјентишу управ-



Слика 5. Приказ вредности размака после активне фазе сушења (након 48 h климатизовања)



Слика 6. Претпостављено кретање влажности по слојевима дрвета током фаза осцилација равнотежне влажности (према Perre 2007)

но на њега. Настанак клизних равни повезан је са раскидањем водоничних веза, а овај процес директно зависи од промене садржаја воде у дрвету. Битно је нагласити да се ова теорија не односи на појаву механосорпционог течења при сушењу, већ при притисним и савојним напонима паралелно са влакнима. Свакако да и током сушења битан утицај на механосорпционо понашање дрвета има раскидање и поновно формирање водоничних веза, односно мобилност молекула (Bazant 1985, Navi et al. 2002, Navi 2007). Најновија истраживања показују да на појаву и величину механосорпционог ефекта битно утичу морфолошка својства дрвних влакана (Dong et al. 2010). Утврђено је да влакна касног дрвета показују већи механосорпциони ефекат од влакана раног дрвета, а исти закључак важи за зрело у односу на јувенилно дрво. Узрок је пронађен у различитом углу влакана у C2 слоју ћелијског зида - мањи угао значи већу механосорпциону деформацију.

Истраживања последњих година су показала да модели који се често користе код описивања сушења дрвета (Ranta-Maunus 1975, Salin 1992) не дају довољно добре резултате код сушења са осцилацијама параметара ваздуха. Због тога што је утврђено да се на почетку сушења јавља и механосорпциона деформација која је трајног карактера, боље резултате даје модел који обухвата и њу (Сл. 7).

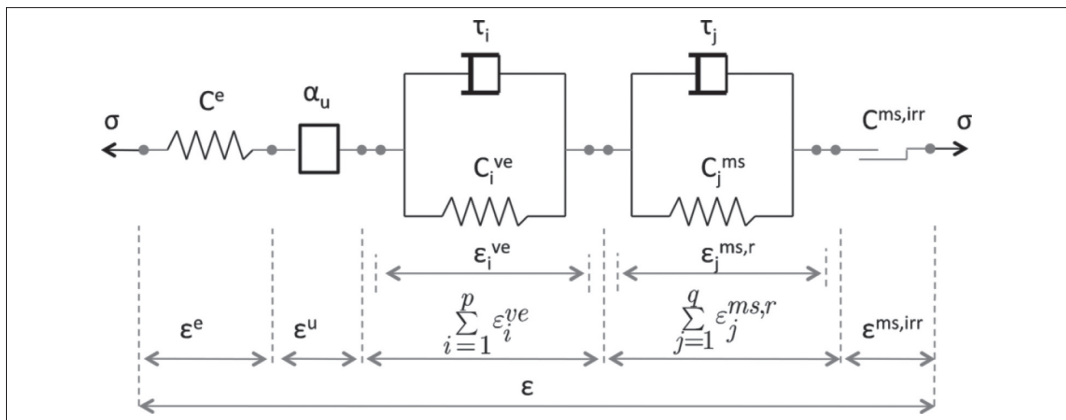
Истраживања (Salem et al. 2016) су потврдила да се трајни (неповратни) део механосорпционе деформације јавља већ при првој промени влажности дрвета и остаје непромењен, док се повратни део деформације са наредним варијацијама влажности повећава до одређене границе.

ЗАКЉУЧЦИ

У раду је истраживан утицај осцилација равнотежне влажности, односно температуре на тачност мерења влажности дрвета у сушари, брзину и квалитет сушења. Утврђено је да, код шаржи са осцилацијама, измерена влажност дрвета осцилира до $\pm 1,5\%$ у подручју влажности изнад 45%. Поред стварних промена влажности површинских слојева дрвета, додатно на мерење утичу ефекат психрометра и недовољна поузданост компензације температуре у подручјима високе влажности дрвета.

Сушење шарже са осцилацијама равнотежне влажности је трајало нешто краће у односу на друге две шарже, а примарни узрок би могао бити повећан градијент влажности у пе-риодима ниске равнотежне влажности - услед повећаног испаравања воде са површине дрвета.

Квалитет сушења изражен кроз коначну влажност, градијент влажности и скорелост је био висок код све три шарже. Ниже вредности



Слика 7. Реолошки модел (Svensson, Torratsi 2002): ϵ^e еластична деформација, ϵ^u хигроекспанзиона деформација, ϵ_i^{ve} вискоеластична деформација, $\epsilon_j^{ms,r}$ повратни део механосорпционе деформације, $\epsilon^{ms,irr}$ трајни (неповратни) део механосорпционе деформације

размака код шаржи са осцилацијама потврђују претпоставку да цикличне промене влажности површинских слојева изазивају додатни механосорпциони ефекат који доприноси релаксацији напрезања у дрвету током сушења.

Напомена: Рад је реализован у оквиру пројеката бр. ТР 31041 и ТР 37008 које финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

ANALYSIS OF MECHANO-SORPTIVE EFFECT IN OSCILLATORY DRYING OF BEECH TIMBER

Milić Goran, associate professor, University in Belgrade – Faculty of Forestry
Todorović Nebojša, assistant professor, University in Belgrade – Faculty of Forestry

Abstract: The paper shows results of analysis of influences of oscillating parameters of drying on measuring wood moisture content in the kiln, rate and quality of drying. For this analysis, we used a conventional drying cycle, a cycle with oscillating equilibrium moisture content (EMC), and a cycle with oscillating temperatures. A special software tool was created for managing the oscillations. It was shown that oscillations of EMC and temperatures result in cyclic changes in wood MC, but also in the additional inaccuracies of MC measurements in the kiln. The drying process of the cycle with oscillating EMC lasted somewhat shorter than the other two cycles. Drying quality was the same or better in the cycles with oscillations as compared to the conventionally dried cycle, and the smaller tensions in the wood confirmed the activation of the additional mechano-sorptive effect during cyclic changes of MC in surface layers.

Keywords: mechano-sorptive effect, oscillatory drying, beech timber, drying quality

INTRODUCTION AND THEORETICAL BASES

There are constant efforts in timber industry to achieve an optimal way of drying timber, that is, to achieve the best possible drying quality in as little time as possible. Due to wood shrinking and the tensions caused by that process, creep plays an important role in timber drying. Creep is a tendency of a solid material to very slowly slide or to get permanently deformed under the action of prolonged stresses. Creep deformations in drying appear as a consequence of inner strains caused by wood shrinking, that is, the shrinking of wood causes tensions that are equivalent to those caused by stresses in ordinary analysis of creep. Creep deformations relax the existing stresses and therefore lower the possibility of cracks. These deformations depend on the environment and are larger with high temperatures and relative humidities. This is one of the reasons why high-temper-

ature drying can be faster than the low-temperature drying, and still make fewer cracks. (*Hanhijärvi 2007*).

There are two basic parts of creep mechanism: the viscoelasticity one and the mechano-sorption one (Fig. 1). Change of moisture content in wood, while the wood is already subject to a certain stress, brings to an increase of creep deformations - the phenomenon known as mechano-sorption creep, or mechano-sorption effect. This effect is very important for timber drying because this deformation is usually higher than the deformation caused by viscoelasticity creep (*Moutee et al. 2010*). These authors examined the effects of alternating moistening and drying on the size of mechano-sorption deformation. It was concluded that the mechano-sorption creep is higher during the first sorption cycle than during the following cycles, and that the first sorption, regardless of whether the wood is moistening or drying, leads to an increase of creep.

Table 1. Drying schedule (beech, 38 mm)

MC (%)	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Temperature (°C)	37	38	38	38	38	40	43	47	52	58	62	62
EMC (%)	15	15	14.6	14.0	13.6	13.1	12.1	9.2	6.8	5.4	4.4	3.9

It should be emphasized that the alternating moistening and drying of wood occurs, to some extent, in any conventional kiln, as a consequence of the reversible air circulation in which the direction of air flow alternates every several hours. Changes of direction cause oscillations of parameters of air in places where the air enters the stacks. The first row of the stack, which is exposed to the harshest conditions gets exposed to the mildest conditions after the reversion of air flow. A new reversion changes the parameters

again. Amplitude of oscillations decreases with the decrease of MC of wood in the kiln because there is an ever smaller amount of water that can change the parameters (Riehl, Welling 2003). Unrelatedly to these uncontrolled oscillations, there were many attempts to introduce into conventional drying the forced, controlled oscillations of parameters of air, in predefined intervals – so-called oscillatory drying (Langrish et al. 1992, Terziev et al. 2002, Sackey et al. 2004, De La Cruz-Lefevre et al. 2009). The goal was mostly to enhance the mechano-sorptive effect and achieve a better drying quality (smaller stresses in wood), but the results of some of these researches were contradictory and often inapplicable in industrial kilns.

The goal of this research is to determine the influences of temperature oscillations or oscillations of EMC on measuring of MC of wood in the kiln, and on the drying rate. The goal is also to determine how the cyclical changes of MC (enhanced mechano-sorptive creep) influence the final drying quality observed through final MC, MC gradient across thickness, and case-hardening.

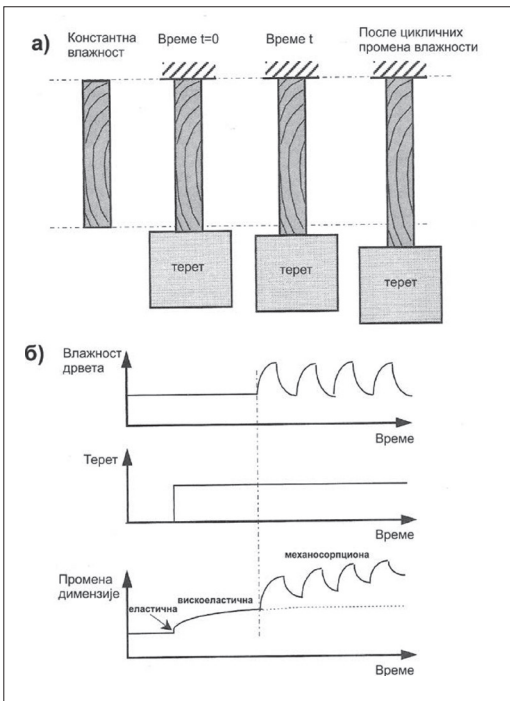


Figure 1. Viscoelasticity and mechano-sorption reactions of wood a) typical experimental procedure, b) schematic display of wood reaction (according to Perré 2007)

MATERIAL AND METHOD

Research was conducted on unsteamed beech timber (*Fagus sylvatica* L.) that was 38 mm thick and 2.1 m long. In total, 12 cycles were dried (Milić et al. 2013, Milić et al. 2014), and this paper analyzes three of them in detail (Table 1): a conventional one, one with oscillating EMC (20% amplitude, with 3-hour phases), and one with oscillating temperatures (10% amplitude, with 3-hour phases). All three cycles dried green timber, and the final MC was 8%.

Drying was conducted in a 0.8 m³ conventional kiln (stack 2.1 m × 0.7 m × 0.9 m), equipped

with two axial fans ($d=500\text{ mm}$, $P=0,37\text{ kW}$), four vents (two for inlet, two for outlet of air), a cold-water humidifying system, and two points for measuring the temperature and the EMC. The kiln contains eight probes for measuring MC and another four for wood temperature. For the oscillatory drying we first had to activate the software tool (Fig. 2) which became a standard solution in the "Dry Manage" software made by Nigos-elektronik. The default setting is that the oscillatory drying is off, so as not to confuse the less experienced users. When this setting is on, it is possible to set the durations of the first and second phase (Period 1 and Period 2), and also the corresponding values of temperatures and EMC's. It was decided that the amplitudes are set like this so that their values are adjusted to the current drying phase. If the values would be set in absolute values, they would be, in some parts of the process, either too big or too small. Thus, an oscillation amplitude of an absolute 2% would, at the beginning of the process (with EMC around 15%), show values between 13% and 17%. The same setting would, toward the end of drying (with EMC around 5%), result in values between 3% and 7%, which would be an unacceptable difference in several aspects. Firstly, kilns can hardly achieve such low MC's (3% and less), and they are difficult to accurately measure. Next, climate conditions vary significantly (for EMC's of 3% and 7% at 60°C, relative humidities are 17% and 47%, respectively). Finally, the theoretical analysis shows that the influence of oscillations in this phase is

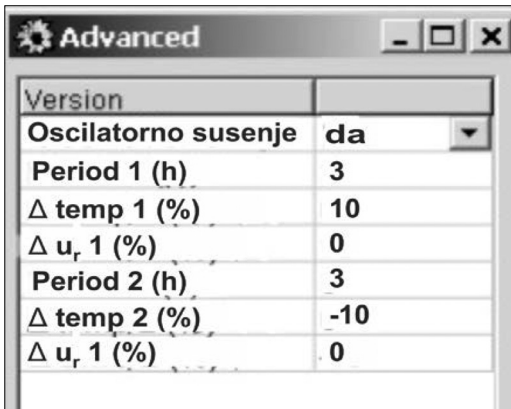


Figure 2. Oscillation parameters in the software tool

not significant (Salin 2003), and so such high amplitudes that would strain the system are unnecessary. The chosen setting enables the amplitudes to be set in a relative sense. This means that if an EMC amplitude of $\pm 10\%$ is set, it will, for the above example, provide values of 13.5% and 16.5% in the beginning, and 4.5% and 5.5% toward the end. A similar analysis is also applicable for setting the relative temperature amplitudes, as opposed to setting them in °C.

Analyzed were the influences of oscillations on accuracy of measurements in the kiln (during the cycle with EMC oscillations probe measurements were compared with oven-dry determined MC), on drying rate, and on drying quality. Also analyzed was the problem of modeling of the mechano-sorptive effect in conditions of oscillating parameters of air and MC, and it was compared to the usual conditions in conventional drying.

In every cycle, sampling was conducted on 30 boards from the center of the stack. Starting MC's and final MC's were determined by oven-dry method. MC gradients across thickness were calculated by oven-dry method from five lamellae cut out along the timber thickness. Case-hardening was determined by measuring gaps (SRPS ENV 14464). For the analysis of final MC, aside from the SRPS EN 14298 standard, statistical parameters which can also be used for a final assessment of drying quality were used - standard deviation, coefficient of variation (k_v) and relative dispersion (RD):

$$k_v = \frac{\sigma}{u_k} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$RD = \frac{\Delta u}{u_k}$$

where:

σ – standard deviation,

u_k – mean final MC (%),

Δu – difference between the maximal and the minimal read-off value (%).

RESULTS AND DISCUSSION

Initial MC (determined by oven-dry method) in all three cycles was higher than 80%, i.e. the timber was raw, which was a consequence of the

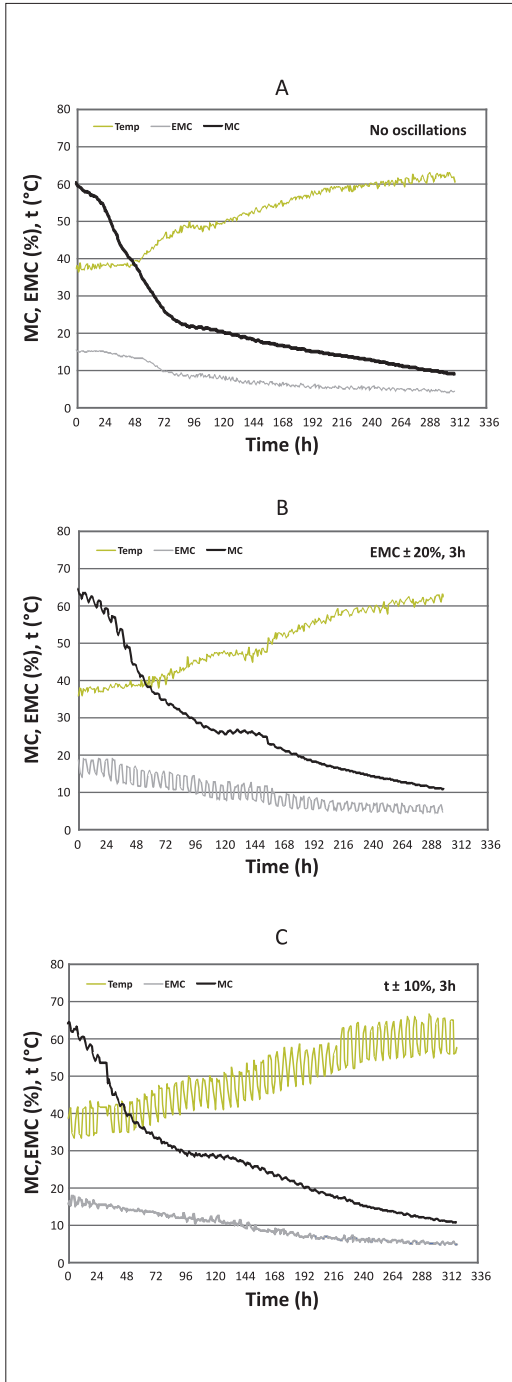


Figure 3. Drying curves and values of temperature and EMC (conventional cycle, oscillating EMC's cycle, oscillating temperatures cycle

short period between felling trees and transporting the timber to the kiln. As expected, the initial MC as measured by probes was lower (Fig. 3). The active phase of drying lasted 308 h with the cycle without oscillations, 300 h with the cycle with oscillating EMC's, and 316 h with the cycle with oscillating temperatures.

Influence of oscillations on measurements of MC

The influence of abrupt changes of parameters was noticeable in the cycles with oscillations, especially in those with oscillating EMC's. In the periods where EMC (also relative humidity) increases, higher MC were measured, and vice versa. MC variations were higher above 45% and were up to $\pm 1.5\%$, while later they decrease and below 20% they become negligible. The first cause of this was the so-called psychrometer effect. With MC significantly above FSP, surfaces of boards acts like the wet bulb. Intensive evaporation of moisture from the surface leads to cooling of wood, that is, the temperature of wood is lower than the air temperature in the kiln, which is itself the temperature of the dry bulb. The difference is higher if the relative air humidity is lower. In measuring of MC of timber, a temperature compensation takes place according to air temperature. This causes the device to register a lower MC than real, because the correction is conducted according to the higher temperature. Naturally, a real decrease in MC also occurs during this period. During the following period, in which EMC increases, there is also an increase in relative air humidity, and evaporation from wood surface is slow (or there can even be a slight adsorption of humidity from the air), and thus there is almost no difference between temperatures of air and wood, which is displayed by a surge of measured MC. Later in the drying, evaporation kept slowing down and so did the psychrometer effect.

Another cause of this phenomenon is an insufficient reliability of temperature compensation with high MC. Aside from the ever-present inaccuracies of moisture meters above FSP, another problem was that, in that range, a small change in temperature causes significant changes in the signal by which MC is determined. Still, consider-

ing that the real MC above 30% is usually higher than the one measured by moisture meters (Fig. 4), it is clear that the observed variations of measurements did not have a big effect on drying rate.

The cycle with oscillating temperatures also resulted in variations of measured MC's as a consequence of different temperatures of wood and the surrounding air, and the unreliability of the compensation of this parameter with high MC. Variations of MC in this case were up to $\pm 1.5\%$ and decreasing with time. In this case, measurements during periods with lower temperatures (at the beginning, around 34°C) were more reliable because the air temperature was closer to that of the wood. On the other hand, with approaching the higher temperatures (at the beginning this was at around 41°C), the air achieved the set temperature relatively quickly, which was not the case with the wood, and this resulted in more inaccurate measurements of MC. In this case, too, variations in MC measuring did not influence the real drying rate.

Influence of oscillations on drying rate

In the cycle with oscillations of EMC, drying rate was higher than in the conventional one. The primary cause for this might be a higher MC gradient during the periods of low EMC, due to an increased evaporation from wood surface. As with drying without oscillations, in this case too two phases of drying can be observed: the first,

when drying speed depends only on the external conditions and when the line of evaporation is on or close to the wood surface, and the second, when the line of evaporation is moving toward the inside and drying rate depends mostly on diffusion. During the first, relatively short phase, wood surface still had MC above FSP and thus the pressure of water vapour was equal to the pressure from saturation, that is, it was a function of surface temperature only. Surface temperature was equal that of the wet bulb, and the heat which the air was giving out to wood was used only for evaporation of water which was reaching the surface by capillary movement. Decrease of relative air humidity during the low EMC also means a higher speed of evaporation because of the increase of the difference between vapour pressures on the surface and in the air. Higher speed of evaporation also means a higher psychrometric difference, i.e. a lower temperature of the dry bulb (wood surface). As wood MC gradually decreases, at the same MC gradient, the intensity of movement of free water decreases due to lower permeability. There is a possibility that this decrease of movement was decelerated by the periods of low EMC, due to the higher MC gradient. During the second drying phase, when surface layers were under FSP, low EMC also accelerates the movement of water, but by these influences: speed of diffusion is higher because of a higher difference between the amount of moisture on the surface and in the center; surface layers shrink due to losing water and thus shorten the way for the water to reach the edge of evaporation from the inside.

During high EMC, the opposite effects occurred. Speed of evaporation, on which the speed of drying in the beginning of the process depends, was lower because the difference between vapour pressures on the surface and in the air was lower. In later stages of drying, surface layers received moisture from the air during this phase, and increased their MC thus somewhat stopping the mentioned positive effects. Regularity of oscillations led to the repeating of positive and negative effects, but because the total MC of wood decreases, the positive influence was dominating. This was enhanced by "psychrometer effect" (especially in the beginning of drying) because of which the measured MC of timber in low EMC

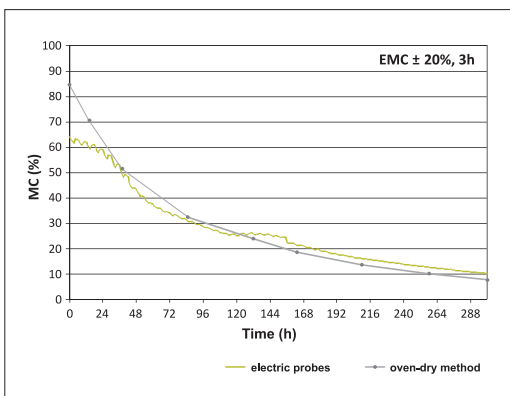


Figure 4. Drying curves measured with moisture meters and determined by oven-dry method (oscillating EMC cycle)

periods was lower than real, and it was around the real one with higher EMC's. With oscillating EMC's, therefore, measured MC was on average lower than in the conventional run, and the parameters of air were somewhat harsher.

Drying speed in the cycle with oscillating temperatures was somewhat lower, which was in line with some previous researches (Salin 2003) stating that the effect of oscillating temperatures was smaller than that of oscillating relative air humidities.

Influence of oscillations on drying quality

Final MC (Table 2) in all three cycles fulfilled the SRPS EN 14298 standard within $\pm 1\%$ from the desired final MC and 93.5% of the boards were within $(0,7 \div 1,3) \cdot u_k$. If we consider some additional statistical parameters, such as coefficient of variation (k_v) and relative dispersion (RD), all three cycles fulfilled the so-called good drying quality (according to Guzenda et al. 2002), that is, all had the coefficient of variation below 20% and the relative dispersion below 0.8 (Table 2). It can be concluded that according to this, and considering the MC gradient across thickness, quality of oscillatory cycles was not lower than that of the conventional cycle. MC gradient in the cycle with oscillating temperatures was lower (a statistically significant difference), but this cycle also lasted longer than the other two.

Case-hardening was measured after the active drying phase, and it was expressed by values of gap, as regulated by SRPS ENV 14464 standard. Figure 5 shows the minimum, the maximum, median and 1st and 3rd quartile for gaps measured after 48 hours

Average values of gap in cycles with oscillating EMC's (2.2 mm) and oscillating temperatures (2.3 mm) were lower than in the cycle without oscillations (2.5 mm).



Figure 5. Values of gap after active drying phase (after 48 h of acclimatization)

ations (2.5 mm). This confirmed the assumption that the oscillating EMC's cause an additional mechano-sorptive effect which contributes to the relaxation of stresses in wood during drying. Mechano-sorptive creep occurs when surface layers go below FSP, that is, when they are under tension stress. Since this creep is directed in the direction of the stress, an additional deformation occurs to relax the tension. Stress relaxation enables a better drying quality toward the end of drying or, as an alternative, a possibility of harsher conditions with the same drying quality as in conventional cycles. It can be assumed that higher amplitudes cause a stronger mechano-sorption and, by that, somewhat lower stresses. In surface layers of wood, the cyclical changes of MC cause the mechano-sorptive effect. The continual variations of EMC cause an additional deformation of surface layers, which cannot be attributed to the elastic component, the component of free shrinking, or the viscoelasticity components which occur at constant MC (Muszynski et al. 2005).

It is important to emphasize that the influence of climate change on wood is not instant, but it occurs with a certain delay which increases

Table 2. Final MC and MC gradient

Cycle	No oscillations	ur±20%, 3 h	t±10%, 3 h
Final MC (%)	7.4	7.8	7.6
Coeff. of variation (%)	12.6	11.0	10.9
Relative dispersion	0.57	0.50	0.40
MC gradient (%/cm)	1.5 (0.5)	1.5 (0.5)	1.2 (0.3)

Standard deviation in parentheses

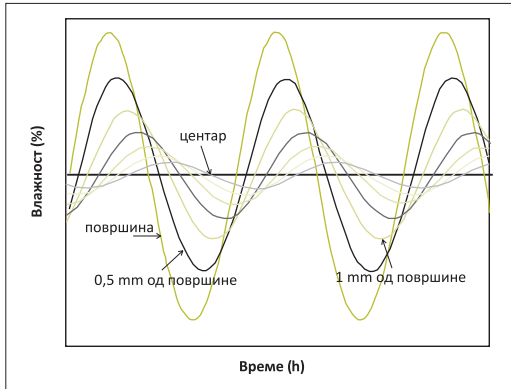


Figure 6. Assumed movement of moisture across layers of wood during phases of oscillatory EMC (according to Perre 2007)

with the distance of a certain layer of wood from the surface. The influence of oscillations decreases closer to the center and it can be concluded that in the center it does not exist, i.e. in the center of wood there is no change in MC which is a direct consequence of the oscillating EMC. On the other hand, surface layer at depth of 0-300 μm reaches EMC very quickly (Rosenkilde 2002). This can be assumed (Fig. 6), but additional research is needed on a microlevel in order to accurately determine the mechanism of water movement during a certain phase and afterwards.

Even though this phenomenon has been known for more than half a century, the mechano-sorptive effect has not been fully analyzed. A

possible explanation of the mechano-sorptive behavior of wood was offered by *Hoffmeyer and Davidson (1989)*. They indicated that the effect is caused by microcracks which appear in cellular walls, the so-called slip planes. A certain angle appears between the slip planes and the longitudinal direction of S2 layer of cellular wall, which causes the microfibrils to tend to align perpendicular to it. The appearance of slip planes is related to the breakage of hydrogenic bonds, and this process directly depends on the changes of the amount of water in wood. It is important to emphasize that this theory applies not only to the appearance of the mechano-sorptive creep in drying, but also to the compression and bending tensions parallel to fibers. Certainly, the breakage and creation of hydrogenic bonds, i.e. the molecular mobility (*Bazant 1985, Navi et al. 2002, Navi 2007*), also has an important influence on the mechano-sorptive behavior of wood. Newest researches show that the appearance and size of mechano-sorptive effect is heavily influenced by morphological properties of wood fibers (*Dong et al. 2010*). It was indicated that the fibers of late-wood have a bigger mechano-sorptive effect than those of earlywood, and the same conclusion is valid for mature wood and juvenile wood. The cause for this was found in a different angle of fibers in S2 layer of cellular wall – a smaller angle means a higher mechano-sorptive deformation.

Researches in the last several years have shown that the models that are often used for

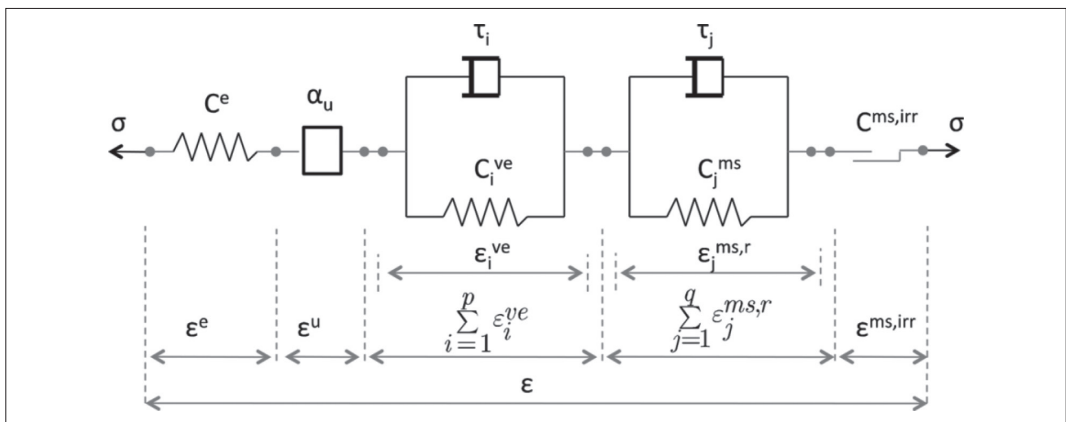


Figure 7. Rheological model (Svensson, Torratsi 2002): ϵ^e elastic strain, ϵ^u hygroexpansion strain, ϵ_i^{ve} viscoelastic strain, $\epsilon_j^{ms,r}$ reverse part of mechano-sorptive strain, $\epsilon^{ms,irr}$ irrecoverable part of mechano-sorptive strain

describing wood drying (Ranta-Maunus 1975, Salin 1992) do not show results that are good enough for drying with oscillating air parameters. Because it was determined that an irrecoverable part of mechano-sorptive deformation occurs at the beginning of drying, the model that also encapsulates this deformation is giving better results (Fig. 7).

Researches (Salem *et al.* 2016) confirmed that the irrecoverable part of mechano-sorptive deformation occurs already with the first change of wood MC, and that it remains unchanged, while the recoverable part of the deformation increases to some extent with the following variations of MC.

CONCLUSIONS

The research examined the influence of oscillating EMC and oscillating temperatures on the precision of measurements of wood MC in the kiln, on drying rate, and on drying quality. It was determined that, in the cycles with oscillations, the measured MC oscillated up to $\pm 1.5\%$ above 45% MC. Aside from the real changes of MC in wood surface, the measurements were additionally influenced by the psychrometer effect and by the insufficient reliability of temperature compensations at high MC.

Duration of the cycle with oscillating EMC's was somewhat shorter than the other two cycles. The primary cause for this might be an increased MC gradient at low EMC's, due to a faster evaporation from the wood surface.

Drying quality, as expressed by final MC, MC gradient, and case-hardening, was high in all three cycles. Lower values of gap in oscillatory cycles confirm the assumption that cyclic changes in MC of surface layers cause an additional mechano-sorptive effect which contributes to relaxation of stresses in wood during drying.

Note: This research was realized within projects TR 31041 and TR 37008, financed by Ministry of Education, Science and Technological Development of Republic of Serbia.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bazant ZP. (1985): Constitutive equation of wood at variable humidity and temperature. *Wood Science and Technology* 19:159–177
- De La Cruz-Lefevre M., Aleon D., Remond R., Perre P. (2009): Reducing shrinkage defaults and/or drying time thanks to oscillating drying conditions. In: *Proceedings of Conference on hardwood processing*, Paris, France.
- Dong F., Olsson AM., Salmen L. (2010): Fibre morphological effects on mechano-sorptive creep. *Wood Science and Technology* 44(3):475–483
- Guzenda R., Majka J., Dudzinski J., Olek W. (2002): Moisture content of timber after drying – estimation of drying quality. 4th COST E15 Workshop “Methods for improving drying quality of wood”, Santiago de Compostela, Spain.
- Hanhijärvi A. (2007): Creep deformation in drying wood. U: *Fundamentals of wood drying*. Perré P. (iz.), A.R.BO.LOR., Nancy.
- Hoffmeyer P., Davidson R.W. (1989): Mechano-sorptive creep mechanism of wood in compression and bending. *Wood Science and Technology* 23(3):215–227
- Langrish T.A.G., Keey R.B., Kumar M. (1992): Improving the quality of timber from red beech (*N. fusca*) by intermittent drying. *Drying Technology*, 10:947–960.
- Milić G., Kolin B., Lovrić A., Todorović N., Popadić R. (2013): Drying of beech (*Fagus sylvatica* L.) timber in oscillation climates: drying time and quality. *Holzforschung* 67(7):805–813.
- Milić G., Kolin B., Todorović N., Gorišek Ž. (2014): Energy Consumption of Beech Timber Drying in Oscillation Climates. *Drvna industrija* 65(4):309–314.
- Moutee M., Fortin Y., Laghdir A., Fafard M. (2010): Cantilever experimental setup for rheological parameter identification in relation to wood drying. *Wood Science and Technology* 44: 31–49.

- Muszyński L., Lagana R., Shaler S.M., Davids W. (2005): Comments on the experimental methodology for determination of the hygro-mechanical properties of wood. *Holzforschung* 59:232-239.
- Navi P., Pittet V., Plummer C. J. G. (2002): Transient moisture effects on wood creep. *Wood Science and Technology* 36:447-462.
- Navi P. (2007): Thermo-hygro-mechanical behaviour of wood viscoelasticity (Micro-mechanical approach to mechano-sorptive creep). COST E35 Workshop. Microstructure and micro-mechanics. Stockholm, Sweden.
- Perré P. (ed.) (2007): Fundamentals of wood drying. A.R.BO.LOR., Nancy.
- Ranta-Maunus A. (1975): The viscoelasticity of wood at varying moisture content. *Wood Science and Technology*, 9:189-205.
- Riehl T., Welling J. (2003): Taking advantage from oscillating climate conditions in industrial timber drying processes. 8th IUFRO International Wood Drying Conference, Brasov, Romania.
- Rosenkilde A. (2002): Moisture content profiles and surface phenomena during drying of wood. Doctoral dissertation, Tratek, Stockholm.
- Sackey E.K., Avramidis S., Oliveira L.C. (2004): Exploratory evaluation of oscillation drying for thick hemlock timbers. *Holzforschung* 58:428-433.
- Salem T., Perré P., Bouali A., Mougel E, Remond R. (2016): Experimental and Numerical Investigation of Intermittent Drying of Timber. *Drying Technology*, published online.
- Salin J.G. (1992): Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechanosorptive creep model. *Holzals Roh-und-Werkstoff*, 50:195-200.
- Salin J.G. (2003): A theoretical analysis of timber drying in oscillating climates. *Holzforschung* 57(4):427-732.
- Svensson S., Toratti T. (2002): Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity. *Wood Science and Technology* 36(2):145-156.
- Terziev N., Salin J.L., Söderström O., Rosenkilde A., Temnerud E. (2002): Oscillation drying of Scots pine timber. COST E15 Workshop. Methods for improving drying quality of wood. Santiago de Compostela, Spain.

