

STANOVENIE NAPÄTÍ V TUHÝCH NÁTEROCH Z PRIEHYBU POVRCHOVO UPRAVENÝCH BUKOVÝCH TELIES POČAS NAVĽHANIA

STRESSES IN SOLID COATINGS ON SURFACE TREATED BEECH SPECIMENS, CALCULATED FROM DEFLECTION VALUES DURING WETTING

Jozef Kúdela – Mária Rešetková

ABSTRACT

In this work is described performance of beech specimens during wetting in an environment with relative air humidity $\varphi \cong 100\%$. One side of each specimen was coated with a polyurethane or a water-soluble lacquer. The experiment modelled unilateral diffusion through an infinite plane board in tangential direction.

From the very beginning, the wetting specimens deflected. With increasing moisture content in the specimens, the deflection increased, with a maximum reached at 12–14 %, followed by a continual decrease down to zero. In no case, however, the offset was complete.

From the deflection values of the specimens we calculated stresses in solid coatings developed during wetting. The stresses were quantified with the aid of several routine mathematical models. The stress values in solid coatings correlated with the specimens' deflection values. During the whole wetting process, the coating films were loaded in compression. The calculated values exhibited differences among the individual models, so modification of the used equations is necessary.

Key words: wetting, beech wood beams, surface treatment, polyurethane varnish, deflection, stresses.

ÚVOD

Kvalita povrchovej úpravy dreva sa posudzuje z viacerých hľadísk. Vyhodnocujú sa defekty vonkajšieho vzhľadu, fyzikálne, mechanické, chemické vlastnosti povrchovej úpravy a odolnosť voči pôsobeniu vonkajších činiteľov (LIPTÁKOVÁ a KÚDELA 1997). Defekty v nátere môžu vzniknúť už počas aplikácie náterovej látky na drevo, v priebehu zasychania, resp. vytvrdzovania, ale aj počas celej doby používania v dôsledku celého radu pôsobenia vonkajších činiteľov. Tieto defekty, ich príčiny, ako aj možnosti ich eliminácie boli popísané v práci KÚDELU (2010).

Častou, nežiaducou chybou povrchovej úpravy sú trhliny v nátere. Trhliny narúšajú celistvosť náterového filmu a stávajú sa tiež východiskovým miestom pre šírenie ďalších

defektov povrchovej úpravy. V dôsledku narastania trhlín sa postupne stráca ochranná funkcia náteru pred vonkajšími vplyvmi.

Za hlavnú príčinu trhlín v nátere sa považujú napätia. Tieto môžu vzniknúť už pri vytvrdzovaní resp. zasychaní náterových látok aplikovaných na drevo a drevné materiály v dôsledku kontrakcie náteru a v dôsledku zvyšovania kohézie vo vnútri náteru ako aj jeho adhézie k podkladu. Po vytvrdnutí náterovej látky môžu byť tieto napätia ešte umocnené napr. v dôsledku vlhkového, tepelného a mechanického namáhania systému drevo – tuhý náter (PECINA a PAPRZYCKI 1995, KÚDELA a LIPTÁKOVÁ 1996, KÚDELA *et al.* 2010).

V prípade dreva ako hydrofilného materiálu je dôležité poznať napätia, ktoré vznikajú v tuhom nátere počas jeho navlhčenia resp. vysušenia systému drevo – tuhý náter. Aj keď sa povrchovou úpravou náterovými látkami sorpčný proces dreva významne spomalí, úplne sa mu nezabráni (KÚDELA *et al.* 1993, DE MEIJER a MILITZ 2001, PALANTI *et al.* 2001, GOOSSENS *et al.* (2003), KÚDELA 2008, 2009, TRUSKALLER *et al.* 2010). Preto pri tomto procese je potrebné počítať s jeho vlhkovým namáhaním.

V prácach KÚDELA a PUŠKÁROVÁ (2010), KÚDELA *et al.* (2010) bolo pomocou reflexnej fotoelasticimetrie ukázané, že v tuhých náteroch aplikovaných na drevo v procese navlhčenia vznikajú zložité stavy napätosti, ktoré popri zmene vlhkosti sú ovplyvnené celým radom ďalších faktorov (druh dreva, druh náterovej látky, hrúbka filmu, atď.).

Cieľom tejto práce bolo sledovať správanie sa jednostranne upravených telies náterovými látkami v procese navlhčenia a aplikovať existujúce rovnice na výpočet napätí v náterovom filme počas navlhčenia.

Teoretický rozbor problému

Šírenie, resp. rozmiestnenie trhlín závisí predovšetkým od spôsobu namáhania a rozloženia napätí. Preto je potrebné poznať rozloženie a veľkosť týchto napätí v nátere pri rôznych spôsoboch namáhania. Na stanovenie napätí v nátere sa používajú rôzne metódy (PERERA 1996, PAYNE *et al.* 1997, PETERSEN *et al.* 1999, CHASON 2000, ABDELKADER a WHITE 2002, RUŽINSKÁ a ČERNECKÝ 2004, YANG a CHANG 2005, KÚDELA 2005, MATTOX 2006, OLIVIER *et al.* 2008, DE MEIJER a NIENHUIS 2009, YAHATA a KOZUKA 2009, ZHANG *et al.* 2009, YANG a CHANG 2005, KÚDELA a PUŠKÁROVÁ 2010, KÚDELA *et al.* 2010). Z citovaných prác vyplýva, že najviac požívanou metódou na stanovenie napätí v náterových filmoch je metóda priehybu prúta (označovaná ako „oblúková metóda“).

CORCORAN (1969) na výpočet napätí v tuhých náteroch pre jednostranne votknutý prút (meranie priehybu na voľnom konci prúta) uvádza rovnicu

$$\sigma = \frac{d E h_1^3}{3l^2 h'(h_1 + h')(1 - \mu)} + \frac{d E_f (h_1 + h')}{l^2 (1 - \mu_f)} \quad (1)$$

V prípade merania priehybu v strede dĺžky prúta platí rovnica

$$\sigma = \frac{4 d' E h_1^3}{3l_0^2 h'(h_1 + h')(1 - \mu)} + \frac{4 d' E_f (h_1 + h')}{l^2 (1 - \mu_f)} \quad (2)$$

kde d – priehyb telesa jednostranne votknutého prúta na jeho voľnom konci, d' – priehyb v strede telesa, E – Youngov modul pružnosti podkladu, E_f – Youngov modul pružnosti náterovej látky, μ – Poissonove číslo podkladu, μ_f – Poissonovo číslo náteru, h_1 – hrúbka podkladu, h' – hrúbka náterového filmu, l – dĺžka telesa.

Tieto rovnice s určitými modifikáciami preberajú aj iní autori. Ak $E \gg E_f$ a $h_1 \gg h'$ druhý člen v rovnicách (1) a (2) možno zanedbať. Rovnice (1), (2) tak nadobudnú tvar:

$$\sigma = \frac{d E h_1^3}{3l^2 h'(h_1 + h')(1 - \mu)} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{4 d' E h_1^3}{3l^2 h'(h_1 + h')(1 - \mu)} \quad (4)$$

KÚDELA a LIPTÁKOVÁ (1996) na výpočet napätí použili rovnicu

$$\sigma = \frac{4 d' E h_1^3}{3l^2 h'(h_1 + h')} \quad (5)$$

YANG a CHANG (2005) počítali napätia v tuhom nátere z priehybu prúta podľa rovnice

$$\sigma = \left(\frac{d}{R^2} \right) \frac{E}{3(1 - \mu)} \left(\frac{h_1^2}{h'} \right), \quad (6)$$

kde R je polomer zakrivenia nosníka a ostatné symboly sú rovnaké ako v predchádzajúcich vzťahoch.

Pre povrchovo upravený, voľne uložený prút na dvoch podperách sa polomer zakrivenia stanoví podľa rovnice (PERERA 1998):

$$R = \frac{l_0^2}{8d'} \text{ alebo } R = \frac{l_0^2}{8d'} \quad (7)$$

kde l_0 – vzdialenosť podpier, d' – priehyb v strede telesa.

MATTOX (2006) počítal napätia z priehybu dlhého, úzkeho a tenkého nosníka (pričom zohľadňuje rozloženie napätí pod a nad neutrálnou osou) podľa rovnice

$$\sigma = \frac{h' \cdot E}{6 \cdot R} \left[\left(\frac{h_1}{h'} \right) + 6 \cdot \frac{E_f}{E} \cdot \frac{Y_f}{h'} \right] \quad (8)$$

kde h_1 – hrúbka podkladu, h' – hrúbka náterového filmu, R – polomer zakrivenia, Y_f – vzdialenosť od neutrálnej osi po náterový film, E – Youngov modul pružnosti podkladu, E_f – Youngov modul pružnosti náterového filmu.

V náterovom systéme pozostávajúcom z niekoľkých vrstiev s rôznymi mechanickými vlastnosťami je napätie v každej vrstve rozdielne a priehyb povrchovo upravenej dosky závisí na všetkých týchto napätiach. V takomto prípade sa počítajú napätia v každej náterovej vrstve zvlášť a výsledné napätie závisí od všetkých týchto vrstiev. Vzťahy na výpočet napätí vo viacvrstvovom náterovom systéme a ich odvodenie sú uvedené v práci PERERA (1998).

Uvedené rovnice sa aplikovali na výpočet napätí v nátere počas vytvrdzovania náterovej látky, resp. na výpočet napätí v nátere počas tepelného namáhania. Látka sa aplikovala na kovový prúžok s presne definovanými vlastnosťami a experimentálne sa meral priehyb týchto prúžkov. Keďže na adhéziu náteru k podkladu majú okrem vlastností náterovej látky vplyv aj vlastnosti podkladu a interakcie na fázovom rozhraní podklad – náterová látka, dá sa očakávať, že tieto interakcie náterovej látky s drevom budú iné ako s kovom. Teda aj tvorba napätí bude rozdielna (KÚDELA a LIPTÁKOVÁ 1996). Zvlášť dôležité sú interakcie, ku ktorým dochádza na fázovom rozhraní a tiež faktory, ktoré tieto interakcie významne ovplyvňujú. Aj z pohľadu vzniku trhlín kritickým miestom je práve fázové rozhranie systému drevo – náterová látka (KÚDELA 2010).

DE MEIJER a NIENHUIS (2009) zisťovali napätia v náteroch po ich aplikácii na drevo a maximálne možné napätia boli počítané z objemových rozdielov napúčania náteru (ΔV_C)

a dreva (ΔV_w), pri máčaní povrchovo upraveného dreva vo vode po 24, 48 a 168 hodinách, podľa rovnice

$$\sigma = \frac{E_f}{1 - \mu_f} (\Delta V_c - \Delta V_w) \quad (9)$$

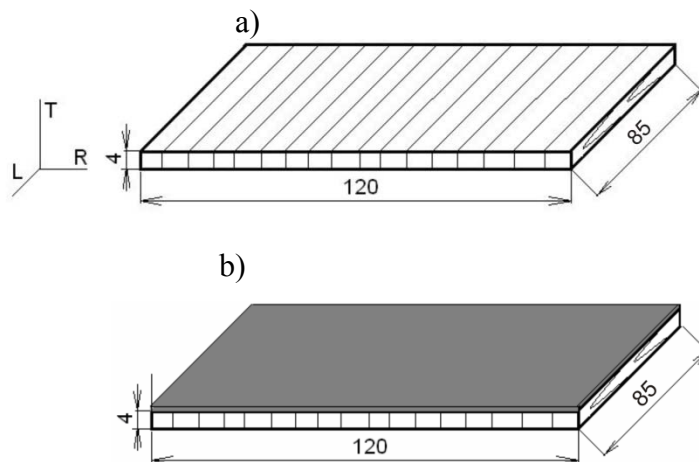
kde E_f – modul pružnosti náteru, μ_f – Poissonovo číslo náteru (0,5).

MATERIÁL A METODIKA

Experimentálne práce boli realizované na bukovom dreve (*Fagus sylvatica* L). Bukové drevo patrí k druhom dreva s vysokým napúčaním a zosychaním, preto aj namáhanie náterových filmov na tomto dreve bude výraznejšie.

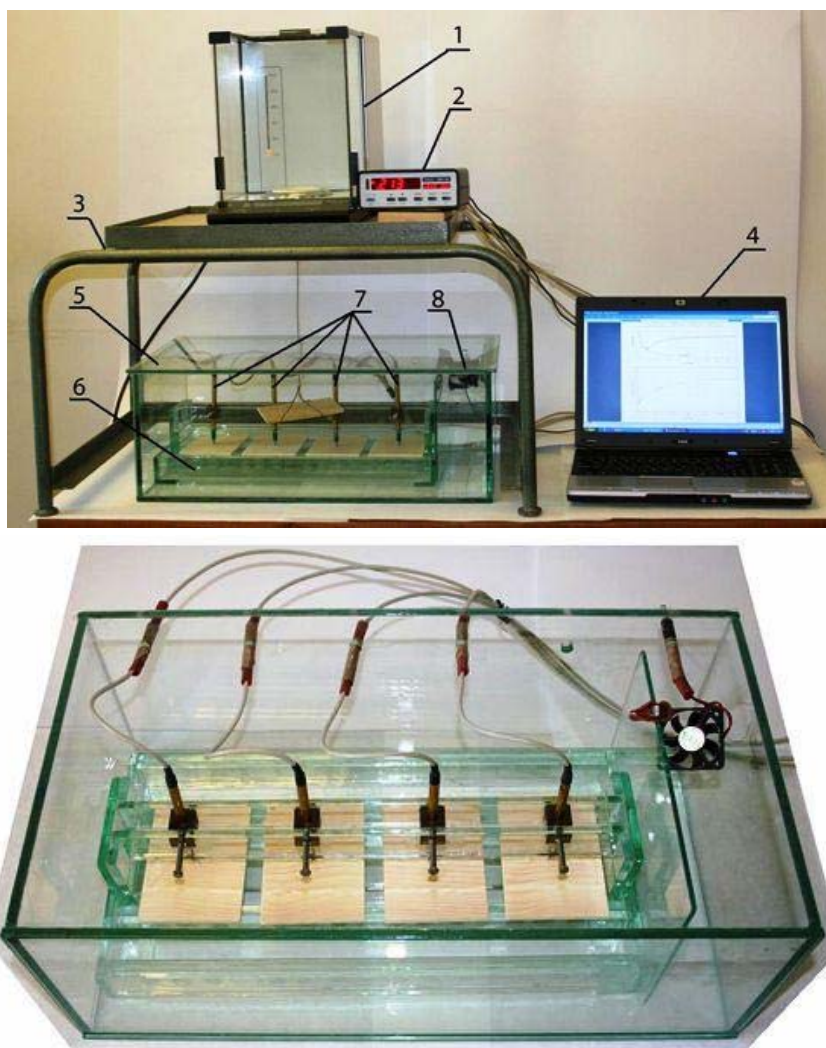
Rozmery skúšobných telies a orientáciu vlákien sme volili tak, aby pri namáhaní počas navlhania povrchovo upraveného telesa došlo k jeho priehybu. Skúšobné telesá rozmerov $120 \times 86 \times 4$ (R \times L \times T) mm boli vyrobené z radiálnych dosiek – obr. 1a.

Skúšobné telesá sme pred povrchovou úpravou klimatizovali na vlhkosť cca 9 %. Plochy boli pred nanášaním náterovej látky zľahka prebrúsené brúsnym papierom zrnitosti 180. Na povrchovú úpravu telies sme použili komerčne vyrábaný polyuretánový (PU) a vodou riediteľný lak (V) na báze akrylátových disperzií. Lak bol nanesený na radiálnu plochu skúšobných telies (obr. 1b). Priemerná hrúbka PU laku bola $75 \mu\text{m}$ a vodou riediteľného laku $100 \mu\text{m}$. Bočné plochy sa natreli hydrofóbnym balzomom, čím sa zabezpečilo jednostranné navlhánie.



Obr. 1 Skúšobné teleso; a) pred povrchovou úpravou, b) po povrchovej úprave.
Fig. 1 Test specimen; a) before surface treatment, b) after surface treatment.

Po vytvrdnutí laku sa zmerala hrúbka telesa s náterom h a hrúbka náterového filmu h' pomocou ultrazvukového hrúbkomera PosiTector 200, z čoho sa potom stanovila hrúbka samotného telesa h_1 . Takto upravené a zmerané telesá boli vložené do špeciálne upravenej sklenenej nádoby, na dve podpery vzdialené od seba 100 mm. Súčasťou experimentálneho zariadenia ďalej boli: merací prístroj Imeco EDK 93 so štyrmi indukčnými snímačmi T501F na kontinuálne snímanie deformácie, analytické váhy, záložný zdroj a počítač.



Obr. 2 Celková zostava experimentálneho zariadenia na sledovanie deformovania povrchovo upravených telies počas navlhčania: 1 – analytické váhy, 2 – merací prístroj Imeco EDK 93, 3 – kovový stojan, 4 – počítač, 5 – sklenená nádoba, 6 – sklenený stojan s rozpätím podpier 100 a 200 mm, 7 – indukčné snímače, 8 – ventilátor.

Fig. 2 Experimental equipment evaluating deflection of surface treated specimens during wetting: 1 – analytic scale, 2 – measuring appliance Imeco EDK 93, 3 – metal stand, 4 – computer, 5 – glass vessel, 6 – glass stand with supports spaced 100 and 200 mm, 7 – induction scanners, 8 – ventilator.

Po uložení telies a namontovaní snímačov na snímanie priehybu sa nádoba uzavrela a špeciálnym otvorom v nádobe sa do nej naliala destilovaná voda, čím sa dosiahla relatívna vlhkosť v nádobe cca 100 %. Rovnomerné rozloženie relatívnej vlhkosti vzduchu v nádobe zabezpečoval ventilátor. Parametre prostredia sme kontrolovali termo-hydrometrom.

Súčasne, na štyroch telesách sa kontinuálne meral priehyb d' v strede ich dĺžky. Z nameraných priehybov sme počítali napätia v náterovom filme podľa rov. 2, 4, 5 a 6. Moduly pružnosti dreva E a Poissonove čísla dreva μ boli prebraté z prác JANSKEJ (1991) a POŽGAJA *et al.* (1997). Moduly pružnosti náterovej látky E_f a Poissonove čísla μ_f boli poskytnuté výrobcom daných lakov.

Na samostatnom telese v nádobe zavesenom na váhach sa kontinuálne sledovala zmena jeho vlhkosti v procese navlhčania. Vlhkosť telies sa zisťovala gravimetrickou metódou. Experimentálne sa zisťovala vlhkosť povrchovo upravených skúšobných telies

po klimatizácii, a to tesne pred uložením telesa do prostredia so zvýšenou relatívnou vlhkosťou vzduchu podľa rovnice

$$w_1 = \frac{m_{w1+NL} - m_{0+NL}}{m_0} \cdot 100 \quad (10)$$

Vlhkosť stanovíme aj po ukončení procesu navlhňania podľa rovnice

$$w_2 = \frac{m_{w2+NL} - m_{0+NL}}{m_0} \cdot 100 \quad (11)$$

kde w_1 – vlhkosť skúšobného telesa s náterovou látkou tesne pred navlhňaním, w_2 – vlhkosť skúšobného telesa s náterovou látkou ihneď po navlhňaní, m_{w1+NL} – hmotnosť povrchovo upraveného skúšobného telesa pri vlhkosti w , m_{w2+NL} – hmotnosť povrchovo upraveného skúšobného telesa ihneď po ukončení navlhňania, m_0 – hmotnosť skúšobného telesa v absolútne suchom stave, ktorú sme vypočítali podľa rovnice

$$m_0 = m_{0+NL} - m_{NL} \quad (12)$$

kde m_{0+NL} – hmotnosť skúšobného telesa s náterovou látkou v absolútne suchom stave, pričom hmotnosť náterovej látky (m_{NL}) vypočítame podľa rovnice

$$m_{NL} = m_{w2} - m_{w1} \quad (13)$$

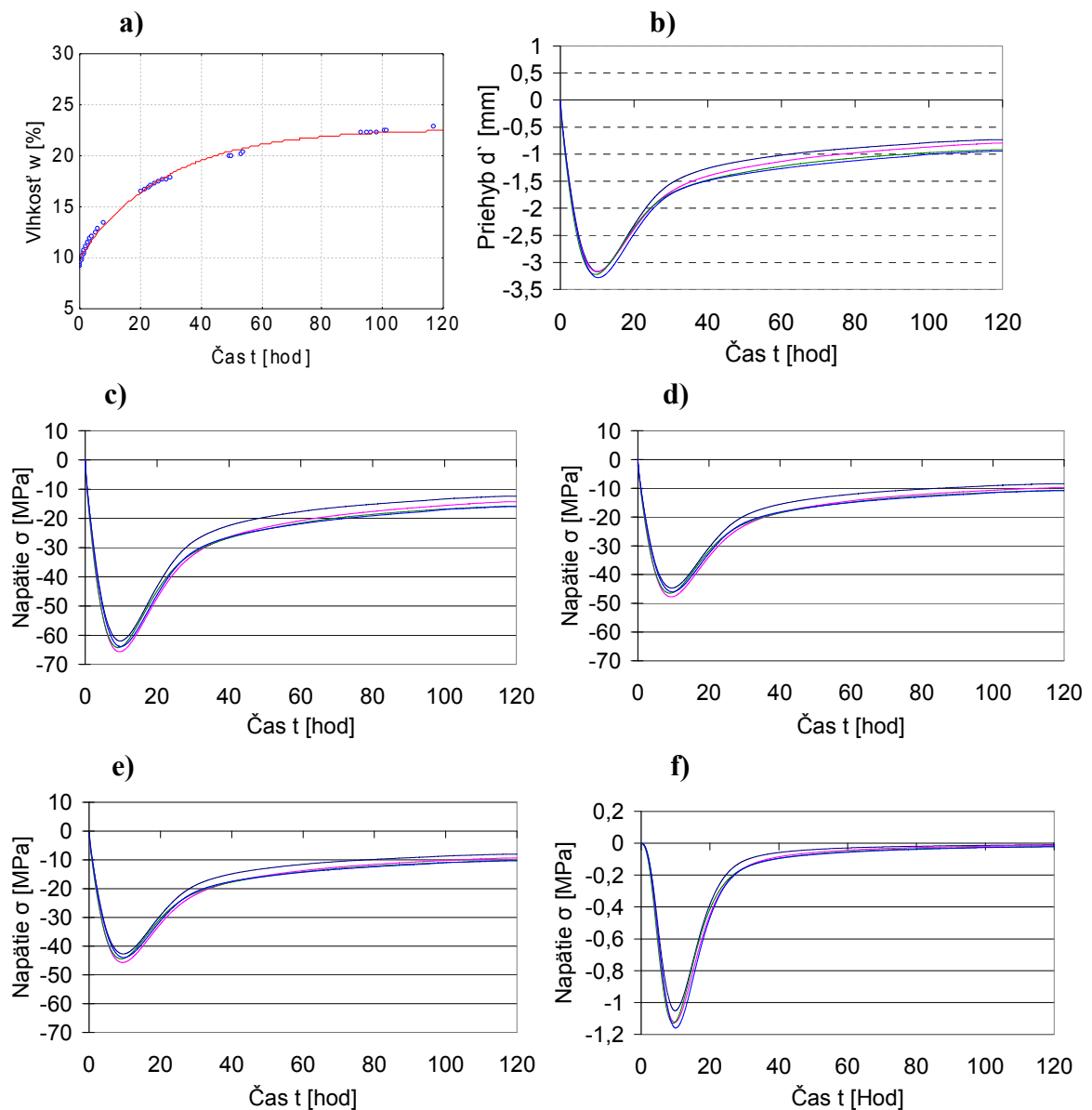
kde m_{w1} – hmotnosť skúšobného telesa pri vlhkosti w , m_{w2} – hmotnosť povrchovo upraveného skúšobného telesa pri vlhkosti w .

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Proces navlhňania skúšobných telies uložených na dvoch podperách sa začal ihneď po naliatí vody do nádoby. Požadovaná relatívna vlhkosť prostredia $\varphi \cong 100\%$ v celom objeme nádoby sa dosiahla približne za desať minút. Preto čas potrebný na vyrovnanie relatívnej vlhkosti vzduchu v nádobe vzhľadom na celú dĺžku procesu 120 hodín môžeme zanedbať. Zmena vlhkosti telies s povrchovou úpravou a ich deformovanie (priehyb) počas procesu navlhňania je znázornená na obr. 3a, b a 4a, b.

Experiment bol usporiadaný tak, že sa jednalo o difúziu nekonečnou rovinou doskou. V prípade telies upravených PU lakom voda difundovala do dreva v tangenciálnom smere cez povrchovo neupravenú plochu. Transport vodných pár cez vrstvu laku môžeme na základe výsledkov KÚDELU a SARVAŠA (2004) a KÚDELU (2009) môžeme zanedbať. Tým sa vytvoril vlhkosťný spád v danom smere, ktorý sa počas trvania procesu navlhňania postupne vyrovnával. Navlhňanie telies bolo najrýchlejšie v prvých fázach tohto procesu a postupne sa spomaľovalo až do dosiahnutia rovnovážneho stavu. (3a).

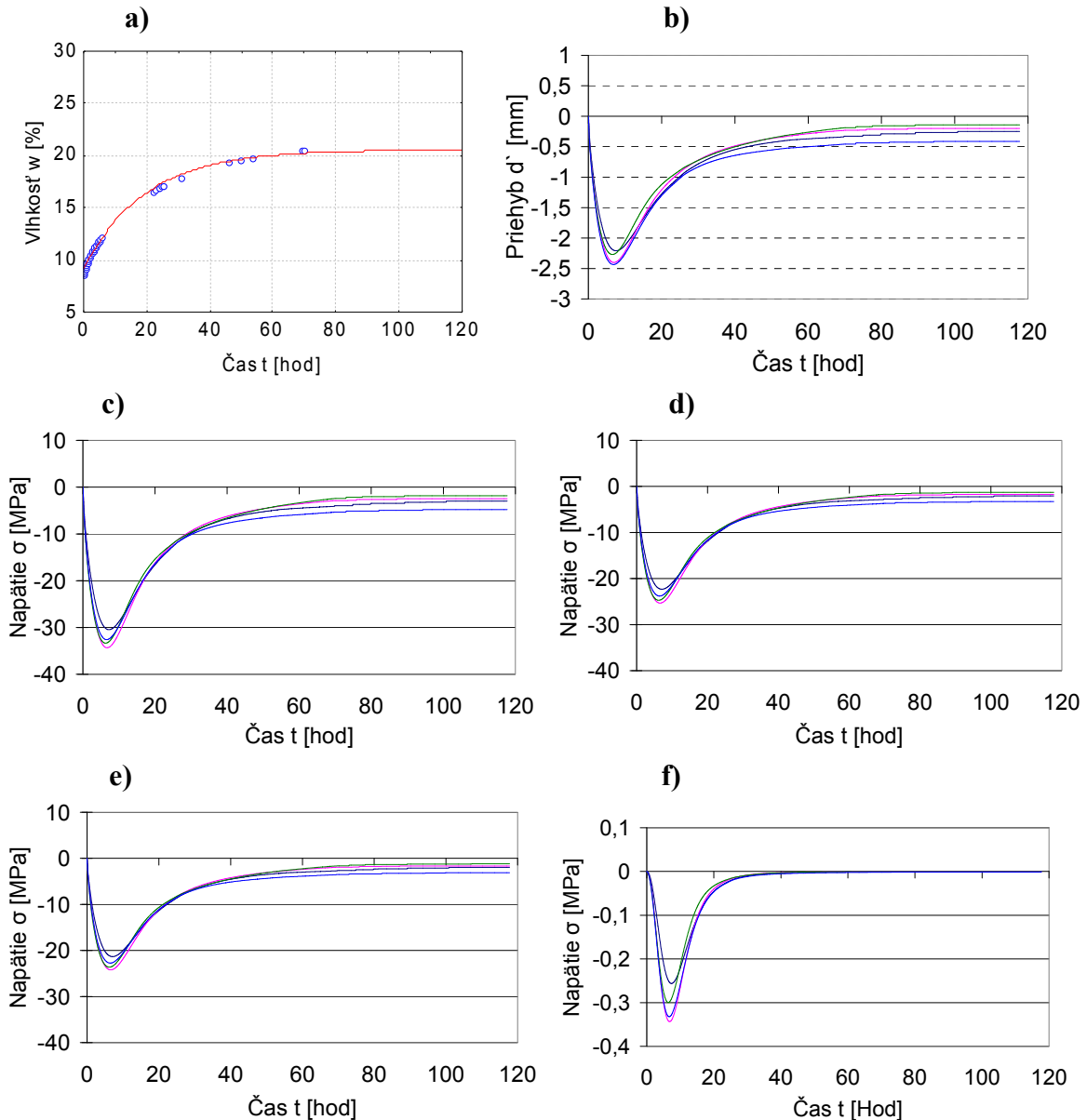
Od samého začiatku navlhňania telies dochádzalo k ich priehybu. Ten sa zväčšoval s narastajúcou vlhkosťou telies. Maximálny priehyb dosahovali telesá pri vlhkosti okolo 12–14 %. V prípade telies upravených PU lakom maximálny priehyb telies bol cca 3,3 mm. Ďalším zvyšovaním vlhkosti priehyb telies sa postupne znižoval a približoval sa k nule (3b). Ani v jednom prípade však nedošlo k úplnému vyrovnaniu telies. Ako vidieť z obr. 3b, priehyb telies po 120 hodinách navlhňania bol cca 0,7–1 mm. Kvalitatívne podobné správanie sa jednostranne upravených drevených prútov počas navlhňania pozorovali tiež PERRERA (1995), KÚDELA a REŠETKOVÁ (2012).



Obr. 3 Časový priebeh navlhčenia, deformovania telies a napätí v náterovom filmoch počítaných podľa jednotlivých matematických modelov; c) podľa rov. 2, d) podľa rov. 4, e) podľa rov. 5, f) podľa rov. 6. (polyuretánový lak).

Fig. 3 Time course of wetting, deflection, and stress patterns development in coating films, calculated with using individual mathematical models; c) Eq. 2, d) Eq. 4, e) Eq. 5, f) Eq. 6. (polyurethane varnish).

Proces navlhčenia v prípade telies upravených V lakom mal podobný priebeh (obr. 4a). Ich deformovanie počas navlhčenia bolo kvalitatívne podobné ale telesá dosahovali pri rovnakej zmene vlhkosti menšie priehyby. Maximálny priehyb telies upravených V lakom bol cca 2,3 mm a po 120 hodinách navlhčenia bol menší ako 0,5 mm (4b). Je to dané tým, že V lak aplikovaný na drevo je priepustnejší pre vzdušnú vlhkosť ako PU lak (KÚDELA a SARVAŠ 2004, KÚDELA 2008), čím sa čiastočne eliminoval vlhkosťný spád.



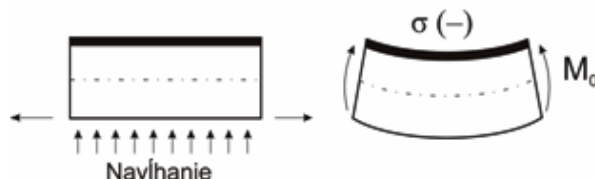
Obr. 4 Časový priebeh navlhčenia, deformovania telies a napätí v náterovom filmoch počítaných podľa jednotlivých matematických modelov; c) podľa rov. 2, d) podľa rov. 4, e) podľa rov. 5, f) podľa rov. 6. (vodou riediteľný lak).

Fig. 4 Time course of wetting, deflection, and stress patterns development in coating films, calculated with using individual mathematical models; c) Eq. 2, d) Eq. 4, e) Eq. 5, f) Eq. 6. (water based varnish).

Priebeh tvorby napätí v náterových filmoch počas navlhčenia bol kvalitatívne podobný ako priehyb telies (obr. 3c–f, 4c–f). Polyuretánový film bol namáhaný na tlak hneď od začiatku procesu navlhčenia. Tlakové napätia rástli s rastúcou vlhkosťou až po maximálny priehyb. S ďalším navlhčianím a postupným vyrovnávaním vlhkosti v telesách sa tlakové napätia zmenšovali.

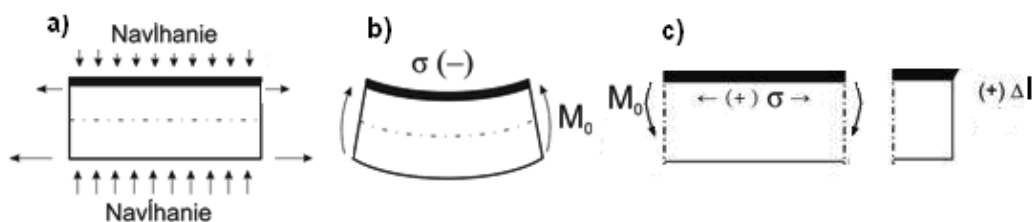
Keďže vzdušná vlhkosť difundovala do telies v podstate len cez povrchovo neupravenú plochu, tak vonkajšie vrstvy začali napúčať. S rastúcou vlhkosťou postupne napúčali ďalšie vrstvy dreva smerom k náterovému filmu. Pri danom vlhkosťnom namáhaní vzniklo podobné zaťaženie ako pri asymetrickom vzpere, resp. asymetrickom ťahu. V dôsledku zaťaženia vznikli v telese ohybové momenty M_0 , ktoré spôsobili jeho

priehyb (obr. 5). Ako vidieť z obr. 5, náterový film bol namáhaný na tlak. Postupným vyrovnávaním vlhkosti po priereze telesa dochádzalo k poklesu ohybových momentov a tým aj k poklesu priehybu a tlakových napätí v náterovom filme (obr. 3).



Obr. 5 Vlhkostné namáhanie jednostranne povrchovo upravených telies PU lakom.
Fig. 5 Moisture loading of specimens with one surface treated with a PU lacquer.

Sorpcia vodných pár telesami upravenými V lakom bola hlavne cez neupravenú plochu, ale už nemožno zanedbať navlhánie aj zo strany náterového filmu (obr. 6a). Navlhánie z povrchovo neupravenej strany spôsobilo namáhanie podobné ako v predchádzajúcom prípade (obr. 6b). V prípade navlhánie cez povrchovo upravenú plochu vznikli opačné ohybové momenty (obr. 6c), ktoré boli síce menšie, ale čiastočne eliminovali priehyb telies a tým aj napätia v náterovom filme. Mechanizmus tvorby napätí pri sorpcii vodných pár cez náterový film je popísaný v práci PECINA a PAPRZYCKI (1995). Vodná para pôsobila na V lak ako čiastočné zmäkčovadlo v dôsledku čoho náterový film sa stal elastickejšim a tým dochádzalo k relaxácii napätí v náterovom filme.



Obr. 6 Vlhkostné namáhanie jednostranne povrchovo upravených telies V lakom.
Fig. 6 Moisture loading of specimens with one surface treated with a water-based lacquer.

Na kvantifikáciu napätí v náterových filmoch sme použili rovnice 2, 4, 5, 6 a 8.

Ako vidieť z obr. 3, napätia počítané podľa jednotlivých modelov sa významne líšili. Najvýraznejšie rozdiely boli pozorované pri najvyšších priehyboch. Tu vychádzali najvyššie hodnoty napätí počítané podľa rov. 2. Významne nižšie napätia (cca o polovicu) sa dosiahli pri použití rovníc 4 a 5. Rozdiel medzi napätiami počítanými podľa rov. 4 a 5 bol zanedbateľný, pretože Poissonovo číslo μ_{LR} bolo veľmi malé (0,013). Tým, že sme ho v rov. 5 vynechali neovplyvnilo významne výsledok. Po dosiahnutí rovnovážnej vlhkosti sa rozdiely medzi napätiami počítanými podľa rov. 2 a rovníc 4 a 5 výrazne znížili.

Z analýzy výsledkov vyplýva, že testované rovnice neposkytujú objektívne výsledky napätí v tuhých filmoch (nereálne vysoké), pokiaľ je rozloženie vlhkosti po priereze prúta nerovnomerné. S vlhkosťou sa významne menia mechanické vlastnosti dreva, a táto skutočnosť nie je v daných modeloch zohľadnená. Po vyrovnaní vlhkosti v celom objeme prúta dochádza aj k vyrovnaniu mechanických vlastností po jeho výške a v takomto prípade výsledky napätí počítané podľa rov. 2, 4 a 5 už dávajú reálnejšie výsledky.

Napätia vypočítané podľa rov. 6 vychádzajú rádovo nižšie ako v predchádzajúcich prípadoch (obr. 3f). Keďže odvodenie tejto rovnice nie je celkom jasné, vyžaduje si hlbšiu

analýzu, aby sme mohli zaujať definitívne stanovisko. Tak isto napätia počítané podľa rov. 8 vychádzajú nereálne vysoké, preto ich v práci ani neuvádzame.

Výsledky ukázali, že významný vplyv na deformovanie jednostranne povrchovo upraveného dreveného prúta má druh náterovej látky (vodou riediteľná, rozpúšťadlová NL). Telesá upravené V lakom v dôsledku rozdielneho mechanizmu navlhčania dosahovali významne nižšie napätia ako telesá upravené PU lakom. Popri tejto skutočnosti vplýva na tvorbu napätí ešte celý rad faktorov (rozdielne moduly pružnosti náterových filmov, hrúbka filmov, atď.). Ako vyplýva z práce KÚDELU a REŠETKOVEJ (2012), s rastúcou hrúbkou filmu napätia klesajú. Porovnaním našich výsledkov s výsledkami v posledne citovanej práci na tvorbu napätí v nátere v procese navlhčania má významný vplyv tiež tvar a rozmery telesa.

ZÁVER

Na základe analýzy výsledkov možno vyvodiť nasledovné závery.

Výsledky preukázali, že v procese navlhčania jednostranne povrchovo upravených telies náterovou látkou dochádza k ich priehybu, pričom v náterovom filme vznikajú tlakové napätia.

Priehyb telies sa v procese navlhčania mení a úmerne so zmenou priehybu telies sa menia aj napätia v náterovom filme.

Testované rovnice na výpočet napätí dávajú reálne hodnoty napätia až po ustálení rovnovážnej vlhkosti po celom priereze telesa. V prípade nerovnomerného rozloženia vlhkosti je potrebná modifikácia týchto rovníc.

LITERATÚRA

- ABDELKADER, A. F. – WHITE, J. R. 2002. Comparison of internal stresses in coatings cured on rigid substrates and on unrestrained thin substrates. *Progress in Organic Coatings*. 2002, (44): 121–129.
- CORCORAN, E. M.: Determining stresses in organic coatings using plate beam deflection. *J. Paint Technol.*. 1969, vol. 41(538): 635–640.
- DE MEIJER, M. – NIENHUIS, J. 2009. Influence of internal stress and extensibility on the exterior durability of wood coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2009, (65): 498–503.
- DE MEIJER, M. – MILITZ, H. 2001. Moisture transport in coated wood. Part 2: Influence of coating type, film thickness, wood species, temperature and moisture gradient on kinetics of sorption and dimensional change. *Holz Roh- u. Werkstoff*. 2001, (58): 467–475.
- GOOSSENS, E. L. J. – ZANDEN, A. J. J. – SPOEL, W. H. 2004. The measurement of the moisture transfer properties of paint films using the cup method. *Progress in Organic Coatings*. 2004, (49): 270–274.
- CHASON, E. Use of kSA MOS System for Stress and Thickness Monitoring during CVD Growth. Dostupné na internete: <http://www.k-space.com/pdfs/kSA_MOS_for_CVD.pdf>
- JÁNSKÁ, R. 1991: Mechanické vlastnosti tuhých filmov náterových látok pre povrchovú úpravu dreva. [Diplomová práca.] Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 48 s.
- KÚDELA, J. 2005. Použitie reflexnej fotoelasticimetrie na identifikáciu stavov napätosti v tuhých náterových filmoch pri rôznych spôsoboch zaťaženia. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2005, 47 (1): 79–85. ISBN 80-228-1560-8, ISSN 1336-3824.
- KÚDELA, J. 2008. Wetting and swelling kinetics of beech wood treated with different coating materials. *Ann. WULS – SGGW, For. and Wood Technol.*, 2008b, s. 37–40.
- KÚDELA, J. 2009. Water vapour transport through surface-treated beech wood under steady-state conditions. *Ann. WULS – SGGW, For. and Wood Technol.*, 2009, (68): 458–462.
- KÚDELA, J.: Defekty povrchovej úpravy dreva náterovými látkami. *Spektra*, 2010, 10(3): 30–34.

- KÚDELA, J. – LIPTÁKOVÁ, E.: Namáhanie náterového filmu po aplikácii na drevo. In.: Interakcia dreva s rôznymi formami energie. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene 1996, s. 109–114.
- KÚDELA, J. – LIPTÁKOVÁ, E. – HAVRÁNEK, J. 1993. Hydrofilná povaha dreva a jej vplyv na povrchovú úpravu. I. Kinetika navlhčania a napučania povrchovo upraveného dreva. In.: Průmysl dřeva '93. Ústí nad Labem : Česká společnost průmyslové chemie, 1993, s. 121–127.
- KÚDELA, J. – PUŠKÁROVÁ, M. 2010. Stavby napätosti v tuhých náteroch po aplikácii na drevo pri mechanickom, tepelnom a vlhkosťnom namáhaní. In 41. Mezinárodní konference o nátěrových hmotách. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2010. s. 201–210.
- KÚDELA, J. – PUŠKÁROVÁ, M. – REŠETKA, M. 2010. Stress patterns in coating films during moisture loading of the system wood – solid coating. In.: Wood structure and properties '10. Zvolen : Technical University in Zvolen, 2010, s. 217–222.
- KÚDELA, J. – REŠETKOVÁ, M. 2012. Napätia v tuhých organických náteroch aplikovaných na drevo počítané z priehybu telies počas navlhčania. In.: 42. Mezinárodní konference o nátěrových hmotách. Pardubice, Univerzita Pardubice, 2012, s. 243–250. ISBN 978-80-7395-490-1.
- KÚDELA, J. – SARVAŠ, J. 2004: Water vapour transport through surface-treated beech wood under steady-state conditions. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*, 46: 25–33.
- LIPTÁKOVÁ, E. – KÚDELA, J. 1997. Činitele ovlivňující povrchovou úpravu dřeva. *Lignum*. 1997, 2(4): 14–16.
- MATTOX, D. M. 2006. Atomistic Film Growth and Resulting Film Properties: Residual Film Stress. 2006. Dostupné na internete: <http://www.svc.org/EP/EP_FeatureGuide2.html>.
- MÉZIN, A. 2006. Coating internal stress measurement through the curvature method: A geometry-based criterion delimiting the relevance of Stoney's formula. *Surface & Coatings Technology*. 2006, (200): 5259–5267.
- OLIVIER, M. G. *et al.* 2008. Influence of the stress generated during an ageing cycle on the barrier properties of cataphoretic coatings. In *Progress in Organic Coatings*. 2008, (63): 323–329.
- PALANTI, S. *et al.* 2001. A simple testing method for the measurement of the water vapour transmission of coated wood longitudinal and tangential to grain direction. *Holzforschung*. 2001, 55(3): 328–331.
- PAYNE, J. A. – MCCORMICK, A. V. – FRANCIS, L. F. 1997. In situ stress measurement apparatus for liquid applied coatings. *Review of Scientific Instruments*. 1997, 68(12): 4564–4568.
- PECINA, H. – PAPRZYCKI, O.: *Lack auf Holz*. I. vyd., Hannover : Vincentz Verlag, 1995, 175 s.
- PERERA, D. Y. 1998. Measurement of Stress in Multicoat Systems. *The Journal of Coatings Technology*. 1998, 70(881): 69–75.
- PERERA, D. Y. 1996. On adhesion and stress in organic coatings. *Progress in Organic Coatings*. 1996, (28): 21–23.
- PERERA, D. Y. 2003. Physical ageing of organic coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2003, (47): 61–76.
- PETERSEN, CH. – HELDMANN, C. – JOHANNSMANN, D.: *Internal Stresses during Film Formation of Polymer Latices*. 1999.
- POŽGAJ, A. – CHOVANEC, D. – KURJATKO, S. – BABIAK, M.: 1997: *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 488 s. ISBN 80-07-00960-4.
- RUŽINSKÁ, E. – ČERNECKÝ, J.: Hodnotenie aplikačných vlastností náterových látok holografickou interferometriou. In.: Danube surface – 46. Medzinárodná galvanická konferencia. Bratislava: SSPU pri STU FCHPT Bratislava, 2004, s. 137–143.
- TRUSKALLER, M. – GRÜLL, G. – BOLLMUS, S. 2010. Comparison of Wood Moisture Content in Coated Panels of Selected Types of Modified Wood during Natural Weathering. In *The Fifth European Conference on Wood Modification*. Riga, Latvia, 2010, s. 267–270.
- YAHATA, R. – KOZUKA, H. 2009. Stress evolution of sol-gel-derived silica coatings during heating: The effects of the chain length of alcohols as solvents. *Thin Solid Films*. 2009, (517): 1983–1988.
- YANG, Y. CH. – CHANG, E. 2005. Measurements of residual stresses in plasma-sprayed hydroxyapatite coatings on titanium alloy. *Surface & Coatings Technology*. 2005, (190): 122–131.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol vďaka finančnej podpore Slovenskej grantovej agentúry VEGA (Grant č. 1/0565/10, Grant č.1/0574/12).

Adresa autora

Prof. Ing. Jozef Kúdela, CSc.
Technická univerzita vo Zvolene
Drevárska fakulta
Katedra náuky o dreve
T.G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
Slovenská republika
kudela@vsld.tuzvo.sk