

VLIV MIKROVLNNÉ PLASTIFIKACE, PLOŠNÉHO LISOVÁNÍ A VYSOKOTEPLTNÍ ÚPRAVY NA MODUL PRUŽNOSTI A MEZ PEVNOSTI V OHYBU KOLMO KE SMĚRU VLÁKEN V RADIÁLNÍM SMĚRU U SMRKU ZTEPILÉHO (*Picea abies* (L.) KARST.)

L. Merenda, K. Nikl

Došlo: 7. července 2009

Abstract

MERENDA, L., NIKL, K.: *Influence of microwave plasticization, high temperature treatment and areal compression on modulus of elasticity and bending strength perpendicular to the gain in radial direction at Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2009, LVII, No. 5, pp. 205–212*

Nowadays wood modification is very-discussed and its importance is growing up. Wood plasticization alias a temporary change of wood properties makes subsequent processing possible. Plasticization is very suitable for subsequent mechanical compressing of wood. Instead steaming and boiling there is a microwave heating for wood plasticization. This kind of heating cuts down the time of plasticization from hours to seconds and also reduces energy consumption.

Pressing of wood perpendicular to the gain in radial direction causes change of wood structure, increases wood density and due to this the wood has increased mechanical properties as bending strength and Young's modulus of elasticity. Modified wood has many positive properties, but also has number of negative properties. The high-temperature treatment eliminates these negative properties to the large extend. The high temperature causes changes in chemical structure and reduces number of sorption places. Due to this the wood has lower equilibrium moisture content. Moisture content greatly affects physical and mechanical properties. The wood that was treated by high temperature (200 °C) has lower moisture content corresponding to the equilibrium moisture content than the wood without high-temperature treatment (the wood only microwave plasticized and mechanically compressed). Lower moisture content makes rising bending strength and Young's modulus of elasticity.

The aim of this article is to compare bending strength perpendicular to the gain in radial direction and Young's modulus of elasticity of Spruce wood that was microwave, mechanical and modified in high-temperature.

Picea abies (L.) Karst., microwave plasticization, pressing of wood, bending strength, Young's modulus of elasticity, wood density

Modifikace představují procesy, které se používají ke zlepšení materiálových vlastností dřeva. Posledních 50 let je ve znamení velkého rozvoje studia cílených změn vlastností dřeva. Spolu s rozvojem vědy a techniky dochází k tlaku na změnu již známých

technologických postupů a vývoj nových postupů tvořících materiály se změněnými vlastnostmi.

Plastifikace neboli dočasná změna vlastností dřeva umožňuje jeho následné zpracování. Plastifikací se dřevo stává plastičtější a v důsledku uvolnění mezibuněčných vazeb je tento druh úpravy dřeva

zvláště vhodný pro následné mechanické lisování dřeva (Bouajila et al., 2006). K plastifikaci dřeva se v největší míře používá paření, v menší míře vaření dřeva. Avšak oba tyto postupy jsou relativně náročné na čas plastifikace. Technologie mikrovlnné plastifikace dřeva tyto nedostatky odstraňuje a zkracuje dobu plastifikace z hodin na sekundy. Zároveň snižuje energetické nároky a nároky na technologické zařízení, jehož pomocí k plastifikaci dochází. Plastifikace dřeva eliminuje poškození dřeva a usnadňuje jeho lisování.

Lisování dřeva lze chápat jako technologický proces, při kterém dochází ke změně struktury dřeva, která v konečném důsledku znamená změnu fyzikálních a s tímto spojených určitých mechanických vlastností. Rovnoměrné plošné lisování kolmo na průběh vláken ve směru radiálním stlačuje dřevo a zvyšuje jeho hustotu. Se zvyšováním hustoty dřeva rostou i jeho mechanické vlastnosti. Jednou z těchto mechanických vlastností je i pevnost dřeva v ohybu. S ohledem na povahu namáhání je pevnost dřeva v ohybu jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností (Matovič, 1993). S namáháním dřeva v ohybu také souvisí jeho deformovatelnost. Tuhost dřeva neboli jeho deformovatelnost popisuje modul pružnosti dřeva. Dřevo se zvýšenou hustotou má řadu pozitivních vlastností, pro které tento postup modifikace využíváme. Avšak vedle těchto vlastností má zhuštěné dřevo také řadu negativních vlastností, které do značné míry eliminuje vysokoteplotní úprava.

Účinky vysokoteplotní modifikace dřeva jsou dobře známy a poměrně hodně využívány k chemickým změnám ve dřevě. Působením vysoké teploty dochází ke snížení počtu volných hydroxylových skupin celulózy, což způsobuje pokles rovnovážné vlhkosti dřeva v závislosti na parametrech prostředí, ve kterém je toto dřevo dlouhodobě uloženo (Chovanec, 1992). Vlhkost dřeva významně ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti. Dřevo, které bylo upraveno pomocí vysoké teploty, má nižší vlhkost odpovídající stavu vlhkostní rovnováhy než dřevo, které takto upraveno nebylo, resp. bylo upraveno pouze zhuštěním po předchozí plastifikaci mikrovlnným zářením. S poklesem vlhkosti souvisí nárůst pevnosti dřeva v ohybu a modul pružnosti (Siau, 1995).

Účelem tohoto článku je porovnat mez pevnosti dřeva v ohybu kolmo na průběh vláken ve směru radiálním a modul pružnosti dřeva smrku ztepilého, mikrovlnně, mechanicky a vysokoteplotně modifikovaného.

MATERIÁL A METODIKA

K posouzení vlivu mikrovlnné plastifikace, rovnoměrného plošného lisování a vysokoteplotní modifikace bylo vybráno dřevo smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst.) o rozměrech $20 \times 20 \times 250$ mm bez odklonu vláken od podélné osy vzorků bez suků, výskytu reakčního dřeva, smolníků a dalších vad v počtu 38 kusů pro referenční skupinu 33 kusů pro skupinu pouze zhuštěných vzorků a 33 kusů pro skupinu

vysokoteplotně upravených vzorků. Po rozdělení byly dvě ze tří skupin vzorků klimatizovány na vlhkost o 2–4 % větší, než je mez nasycení buněčných stěn. Vlhkosti vzorků 32 % (mez nasycení buněčných stěn smrku ztepilého) se dosáhlo jejich uložením do hermeticky uzavřené nádoby nad hladinu destilované vody. Relativní vlhkost vzduchu uvnitř nádoby byla blízká nasycení ($\phi = 99,5\%$) a jeho teplota byla $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Vlhkosti 34–36 % bylo dosaženo máčením vzorků v destilované vodě, jejíž teplota byla $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Konečná hodnota vlhkosti byla kontrolována gravimetricky. Třetí skupina vzorků se dále neupravovala a sloužila jen jako referenční pro posouzení velikosti změny vlastností vlivem dané modifikace.

Vzorky s odpovídající vlhkostí se ohřály v mikrovlnné troubě Sencor SMW 7223 na teplotu $70\text{--}80^\circ\text{C}$. Při frekvenci mikrovlnného záření 2450 MHz a výstupním výkonu mikrovlnné trouby 900 W se dřevo na danou teplotu ohřálo za dobu 45 s. Během ohřevu dojde ke ztrátě vlhkosti vzorků o 2–5 %. Kombinace vlhkosti těsně pod mezí nasycení buněčných stěn a teploty mezi 70 a 80°C způsobuje plastifikaci ligninu ve dřevě, což umožňuje jeho plošné slisování bez mechanického poškození.

Plastifikované vzorky dřeva se bezprostředně po ohřevu uložily do speciálních přípravků a v těchto přípravcích se plošně slisovaly kolmo na průběh vláken v radiálním směru. Poměr slisování byl 50 %. Lisovací tlak se pohyboval v rozmezí 0–13 MPa v závislosti na velikosti slisování. Před slisováním byl poměr jarního a letního dřeva 64 % / 36 %, po slisování byl tento poměr 42 % / 58 %. Fixace tvaru po slisování se provedla v lisu, který přitlačel lisovací desky ke vzorku.

Po vložení vzorků i s přípravky do laboratorní teplovzdušné sušárny došlo k odstranění vlhkosti dřeva při teplotě 60°C . Obě skupiny vzorků se vysušily na vlhkost 8 %. Poté se vzorky vyjímaly z lisovacích přípravků. Jedna skupina vzorků se dále neupravovala. Druhá skupina vzorků se dále vysušila na vlhkost 0 % při teplotě $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Vzorky zbažené veškeré vázané vody se umístily do hermeticky uzavíratelné laboratorní komory umožňující vysokoteplotní konvenční ohřev pomocí topných spirál a změnu tlaku prostředí. Při 200°C a podtlaku 0,3–0,5 MPa se vzorky tepelně upravovaly po dobu čtyř hodin.

Po ochlazení se všechny tři skupiny vzorků umístily do temperované místnosti s teplotou 21°C a relativní vlhkostí vzduchu 50 %. Tím došlo k vyrovnání vlhkosti u všech skupin na hodnotu odpovídající rovnovážné vlhkosti dřeva.

Stanovení modulu pružnosti a meze pevnosti v ohybu kolmo na průběh vláken v radiálním směru se provádělo na univerzálním testovacím stroji ZWICK/Z050/TH 3A v souladu s technickou normou ČSN EN 408 Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností.

Aby bylo možné dané výsledky všech skupin porovnat, bylo potřeba přepočítat danou hodnotu

meze pevnosti v ohybu u všech tří skupin vzorků na stejnou vlhkost. V tomto případě 12%. Přepočet se provedl podle vzorce (1).

$$\sigma_{12} = \sigma_w [1 + \alpha(w - 12)], \quad (1)$$

kde:

w počáteční relativní vlhkost dřeva,

σ_w ... pevnost dřeva při zkoušení,

α opravný koeficient vyjadřující vliv vlhkosti na daný způsob zatížení, v tomto případě je hodnota koeficientu 0,04.

Taktéž bylo potřeba přepočítat hodnotu modulu pružnosti u všech skupin vzorků na hodnotu odpovídající vlhkosti dřeva 12%. Přepočet se provedl dle vzorce (2).

$$E_{12} = \frac{E_w}{1 - \alpha(w - 12)}, \quad (2)$$

kde:

w počáteční relativní vlhkost dřeva,

E_w ... modul pružnosti dřeva při zkoušení,

α opravný koeficient vyjadřující vliv vlhkosti na daný způsob zatížení, v tomto případě je hodnota koeficientu stejná jako u rovnice (1), a to 0,04.

Mechanické vlastnosti dřeva jsou přímo úměrně závislé na hustotě dřeva. Při poměru stlačení 50% vzroste hustota dřeva dvojnásobně, avšak vysokoteplotní úprava dřeva hustotu změní. Stanovení hustoty dřeva při vlhkosti 0% bylo provedeno taktéž v souladu s platnou normou ČSN EN 408.

Dřevo smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) Karst.) o rozměrech 10 × 20 × 30 mm bylo vysušeno na vlhkost 0% v laboratorní sušárně při 103 ± 2 °C. Z hmotnosti a rozměrů vysušených vzorků byla zjištěna hustota dřeva. Skupina referenčních vzorků obsahovala 323 kusů, skupina pouze zhuštěných vzorků 174 kusů a skupina vysokoteplotně upravených vzorků 149 vzorků.

VÝSLEDKY

Rovnoměrné plošné lisování dřeva kolmo na vlákna zvyšuje jeho hustotu. V tomto případě, kdy se vzorky slisovaly ve směru radiálním z původních 20 mm na tloušťku 10 mm, stoupla hustota

dřeva dvojnásobně. Hustota slisovaného dřeva, které nebylo vysokoteplotně upraveno, byla 878,76 kg.m⁻³ (medián) při vlhkosti dřeva 0%. Tato hodnota je dvojnásobná oproti neslisovanému dřevu smrku ztepilého, jehož hustota byla 433,74 kg.m⁻³. Matovič (1993) uvádí průměrnou hustotu dřeva smrku ztepilého 420 kg.m⁻³ při vlhkosti 0%. V porovnání s námi naměřenou hodnotou se tato příliš neliší. Působení vysoké teploty (200 °C) po dobu čtyř hodin změnilo chemickou strukturu dřeva a tím i jeho hustotu. Hustota takto upraveného dřeva byla 896,09 kg.m⁻³, což je nárůst o 17,33 kg.m⁻³ oproti dřevu pouze slisovanému. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. I a graficky znázorněny na Obr. 1.

Chemické procesy probíhající během tepelné modifikace dřeva mají za následek změnu sorpčních vlastností dřeva, které má pak nižší rovnovážnou vlhkost. Ke vzájemnému porovnání parametrů dřeva tepelně upraveného a dřeva pouze slisovaného bylo potřeba přepočítat hodnoty mezí pevností a modulů pružností na stejnou hodnotu vlhkosti dřeva. Po přepočtu všech hodnot na vlhkost dřeva 12% je modul pružnosti nativního dřeva smrku ztepilého 8 242,25 MPa, tato hodnota se téměř neliší od hodnoty 8 210 MPa, kterou naměřili Požgaj a kol. (1993). Modul pružnosti u dřeva pouze mikrovlnně plastifikovaného a slisovaného na polovinu jeho původní tloušťky je 16 475,96 MPa (medián). Modul pružnosti slisovaného dřeva, které bylo tepelně upraveno, je o 1 283,04 MPa nižší, a to 15 192,92 MPa jak uvádí popisná statistika v Tab. II a je graficky znázorněno na Obr. 2. Mez pevnosti dřeva smrku ztepilého před zhuštěním byla 72,6 MPa. Požgaj a kol. (1993) uvádějí mez pevnosti nativního dřeva smrku ztepilého 70,6 MPa. Tato hodnota se taktéž téměř neliší od námi naměřených hodnot. Mez pevnosti dřeva po zhuštění, které nebylo tepelně upraveno, je 121,8 MPa a dřeva, které se tepelně upravilo, je tato hodnota 124 MPa, což je nárůst o 2,2 MPa (Tab. II), graficky znázorněno na Obr. 3.

Pokud je dřevo dlouhodobě uloženo v prostředí o určité relativní vlhkosti a teplotě vzduchu, v tomto případě 50% ± 5% a 20 ± 2 °C, ustálí se vlhkost dřeva na určité hodnotě. U nativního neupraveného dřeva smrku ztepilého byla tato rovnovážná vlhkost 7,51%. Rovnovážná vlhkost rovnoměrně plošně zhuštěného dřeva byla 7,61% a dřeva následně tepelně upraveného byla 5,84%. Rozdíl mezi dřevem sliso-

I: Hustota dřeva smrku ztepilého neupraveného, pouze zhuštěného a zhuštěného a vysokoteplotně upraveného při vlhkosti 0 %

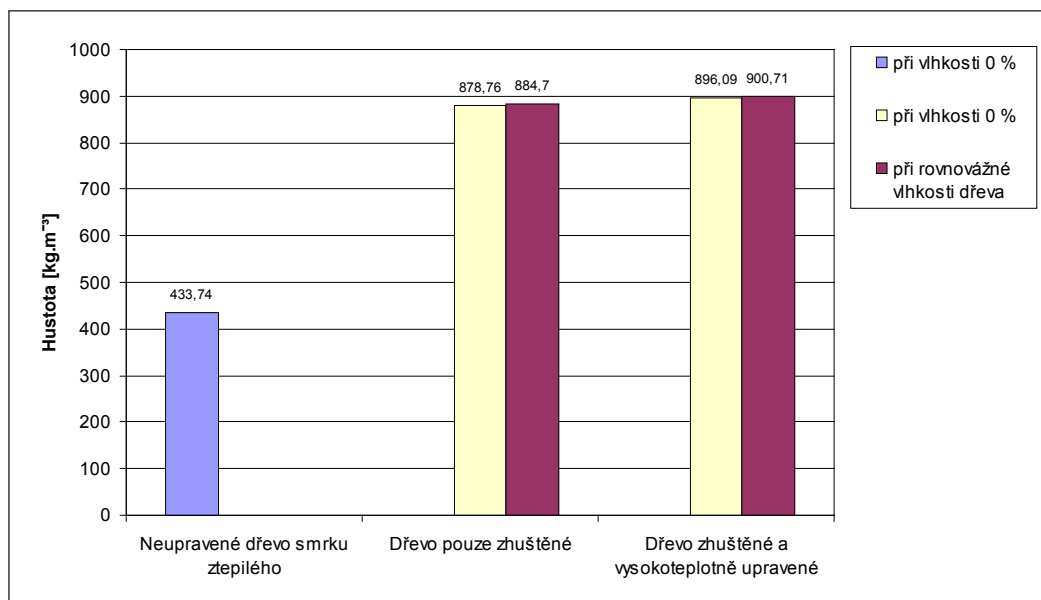
SM	Počet vzorků	Střední hodnota [MPa]	Medián [MPa]	Min. [MPa]	Max. [MPa]	25 % Kvantil [MPa]	75 % Kvantil [MPa]	Směr. Odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
Hustota neupraveného dřeva	323	428,30	433,74	352,12	498,97	394,32	469,20	33,81	7,9
Hustota dřeva pouze zhuštěného	174	873,75	878,76	658,66	1 029,77	831,05	920,14	72,68	8,3
Hustota dřeva zhuštěného a vysokoteplotně upraveného	149	900,28	896,09	715,24	1115,7	855,06	942,61	59,55	6,6

II: Modul pružnosti a mez pevnosti dřeva smrku ztepilého neupraveného, pouze zhuštěného a zhuštěného a vysokoteplotně upraveného. Hodnoty přepočteny na vlhkost 12 %.

SM	Počet vzorků	Střední hodnota [MPa]	Medián [MPa]	Min. [MPa]	Max. [MPa]	25 % Kvantil [MPa]	75 % Kvantil [MPa]	Směr. Odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
Dřevo neupraveného smrku ztepilého									
Modul pružnosti	38	8 198,50	8 242,25	5 463,76	10 936,06	6 832,20	9 561,83	1 576,57	19,23
Mez pevnosti	38	66,82	72,60	45,74	86,97	54,21	77,40	11,31	17,2
Dřevo pouze zhuštěné									
Modul pružnosti	33	16 214,08	16 475,96	11 156,43	21 512,01	14 388,00	18 009,03	2 535,16	15,64
Mez pevnosti	33	121,80	121,80	84,86	160,60	108,81	137,12	19,78	16,24
Dřevo zhuštěné a vysokoteplotně upravené									
Modul pružnosti	33	14 785,70	15 192,92	9 284,92	17 930,54	13 305,48	16 608,03	2 080,68	14,1
Mez pevnosti	33	117,70	124,00	72,21	161,39	105,90	128,90	20,32	17,26

III: Hustota, modul pružnosti a mez pevnosti dřeva pouze zhuštěného a zhuštěného a vysokoteplotně upraveného dřeva smrku ztepilého při rovnovážné vlhkosti dřeva

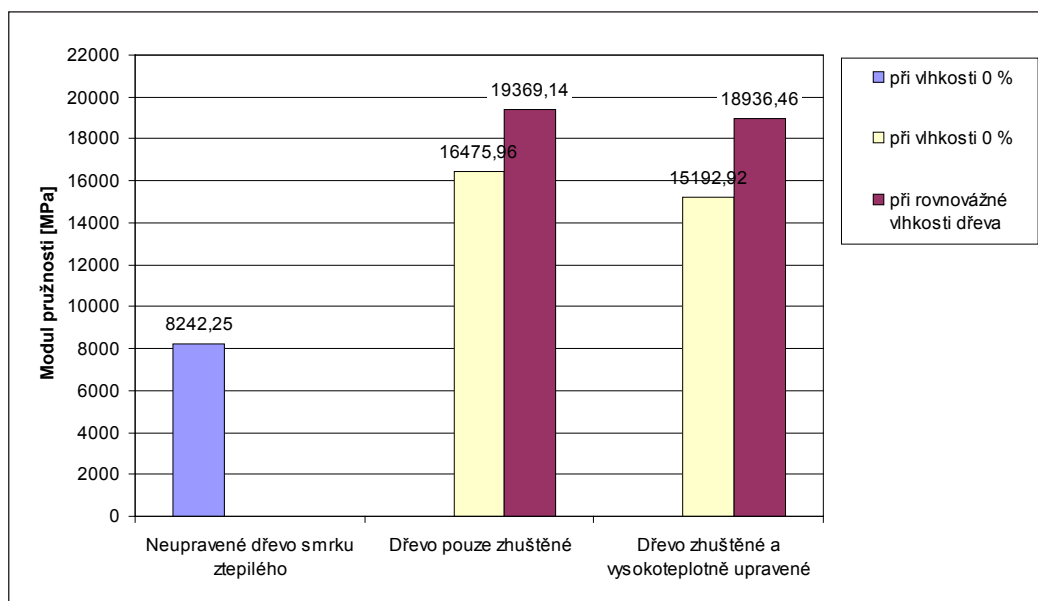
SM	Počet vzorků	Střední hodnota [MPa]	Medián [MPa]	Min. [MPa]	Max. [MPa]	25 % Kvantil [MPa]	75 % Kvantil [MPa]	Směr. Odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
Dřevo pouze zhuštěné, hodnoty při rovnovážné vlhkosti dřeva									
Hustota dřeva	174	879,70	884,70	667,55	1 037,51	835,54	926,84	73,74	8,38
Modul pružnosti	33	19 061,28	19 369,14	13 115,50	25 289,52	16 914,53	21 171,42	2 980,33	15,64
Mez pevnosti	33	147,71	147,77	102,93	194,79	131,99	166,33	24,00	16,25
Dřevo zhuštěné a vysokoteplotně upravené, hodnoty při rovnovážné vlhkosti									
Hustota dřeva	149	906,75	900,71	727,22	1 129,86	860,66	949,25	59,98	6,60
Modul pružnosti	33	18 428,89	18 936,46	11 572,73	22 348,63	16 583,95	20 700,25	2 593,36	14,10
Mez pevnosti	33	156,19	164,55	95,82	214,16	140,52	171,05	26,96	17,26



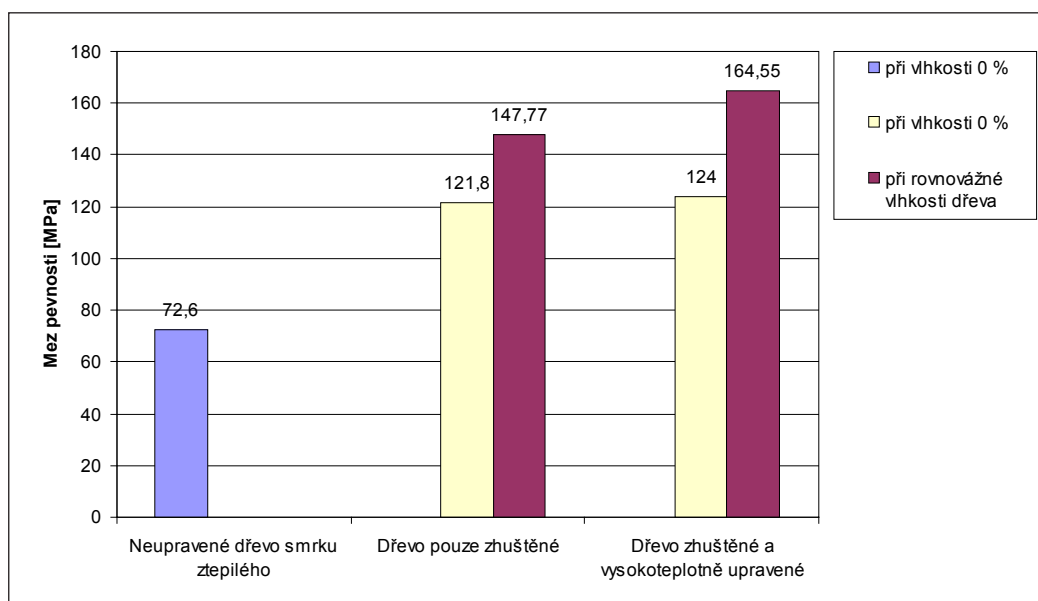
1: Graf hustoty (medián) dřeva smrku ztepilého před zhuštěním, po zhuštění a po vysokoteplotní úpravě při vlhkosti 0 % a při rovnovážné vlhkosti dřeva (dřevo pouze zhuštěné 7,61 %, dřevo zhuštěné a vysokoteplotně upravené 5,84 %)

vaným a neslisovaným je pouze 0,1%, avšak mezi dřevem pouze zhuštěným a dřevem zhuštěným a tepelně upraveným je tento rozdíl 1,67%. Rozdílná

vlhkost dřeva způsobuje i rozdílné mechanické vlastnosti dřeva. Podíváme-li se popisnou statistiku uvedenou v Tab. III, zjistíme, že za stejných pa-



2: Modul pružnosti (medián) dřeva smrku ztepilého před zhuštěním, po zhuštění a po vysokoteplotní úpravě při vlhkosti 12 % a rovnovážné vlhkosti dřeva (dřevo pouze zhuštěné 7,61 %, dřevo zhuštěné a vysokoteplotně upravené 5,84 %)



3: Mez pevnosti (medián) dřeva smrku ztepilého před zhuštěním, po zhuštění a po vysokoteplotní úpravě při vlhkosti 12 % a rovnovážné vlhkosti dřeva (dřevo pouze zhuštěné 7,61 %, dřevo zhuštěné a vysokoteplotně upravené 5,84 %)

rametrů prostředí (relativní vlhkost vzduchu 50 %, teplota 20 °C) má různě modifikované dřevo různé vlastnosti. Mez pevnosti zhuštěného dřeva bez tepelné úpravy je 147,77 MPa (medián). Mez pevnosti tepelně upraveného dřeva je o 16,78 MPa větší, konkrétně 164,55 MPa. Tento rozdíl je graficky znázorněn na Obr. 3.

Poklesem rovnovážné vlhkosti tepelně upraveného dřeva oproti dřevu tepelně neupravenému došlo ke snížení rozdílů mezi hodnotami modulu pružnosti. Modul pružnosti dřeva slisovaného je 19 369,14 MPa a modul pružnosti dřeva slisovaného

a vysokoteplotně upraveného je 18 936,46 MPa, což značí rozdíl 432,68 MPa (Obr. 2.).

Variabilita souborů vyjádřena směrodatnou odchylkou a variačním koeficientem výběrových souborů (Tab. I, II, III) vykazují nízké hodnoty, které mají dostatečnou vypovídající hodnotu o daných způsobech modifikace dřeva na změnu modulu pružnosti a meze pevnosti v ohybu kolmo ke směru vláken v radiálním směru a pohybují se v rozmezí, které uvádí i odborná literatura (Matovič, 1993; Požgaj a kol., 1993).

DISKUSE

Hustota dřeva je jedna z nejvýznamnějších charakteristik, která významně ovlivňuje většinu fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Nativní dřevo smrku ztepilého má průměrnou hustotu $433,74 \text{ kg.m}^{-3}$ (vlhkost dřeva 0%) a mez pevnosti 72,6 MPa (vlhkost dřeva 12%). Zvýšením hustoty dřeva dojde ke zvýšení meze pevnosti dřeva v ohybu. Při ohybu dochází ke kombinaci tahového, tlakového a smykového napětí. Normálové tlakové a tahové napětí způsobují zkrácení (prodloužení) určitých vrstev tělesa. Tyto deformace ovlivňuje odklon vláknitých elementů buněčných stěn. Zhuštěním dřeva dojde ke snížení odklonu vláken celulózy od podélné osy a tím vzroste pevnost zejména jarního dřeva, které se slisováním nejvíce deformuje. Snížením odklonu vláken dojde také ke snížení deformovatelnosti dřeva a nárůstu modulu pružnosti. Dřevo slisované na 50 % původního rozměru kolmo na vlákna ve směru radiálním má téměř dvojnásobnou hodnotu modulu pružnosti oproti dřevu neslisovanému, jak uvádí literatura.

Úpravou slisovaného dřeva vysokou teplotou (200 °C) se změní jeho hustota. To značí změnu strukturálního složení chemických složek dřeva, zejména sacharidických, jakými jsou celulóza a hemicelulózy. Nárůstem hustoty dřeva vzroste jeho pevnost. Po čtyřech hodinách působení teploty 200 °C se mez pevnosti dřeva v ohybu kolmo na průběh vláken v radiálním směru zvýší ze 121,8 MPa na 124 MPa (hodnoty mediánu meze pevnosti přepočteny na vlhkost dřeva 12 % (Tab. II, Obr. 3.).

Vysokoteplotní modifikace zřejmě způsobila uvolnění fibril celulózy a strukturální změnu ligninosacharidové matrice, a tím přispěla k lepší defor-

movatelnosti dřeva. Modul pružnosti klesl z hodnoty 16 475,96 MPa na hodnotu 15 192,92 MPa po přepočtu na vlhkost 12 % (Tab. II, Obr. 2.).

Variabilita výběrových souborů vyjádřená variačním koeficientem uvedená v Tab. II a III, zejména u hodnot modulu pružnosti a meze pevnosti by mohla být nižší s větším počtem testovaných vzorků. Avšak uvedené hodnoty jsou dostatečně nízké mající dostatečnou vypovídající hodnotu o zkoumaných veličinách.

Vysokoteplotní modifikace snížila počet sorpčních míst v chemické struktuře dřeva, které jsou schopny vázat molekuly vody. Touto změnou dojde i ke změně vlhkosti dřeva odpovídající stavu vlhkostní rovnováhy. Proto má vysokoteplotně modifikované dřevo jinou rovnovážnou vlhkost než dřevo, které takto upraveno nebylo. Vlhkost dřeva významně ovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva, zejména jeho pevnost a pružnost. Vysokoteplotně upravené dřevo, které bylo dlouhodobě uloženo v prostředí s danými podmínkami (relativní vlhkost vzduchu a teplota vzduchu), má nižší rovnovážnou vlhkost než dřevo, které nebylo tepelně upravené (za stejných podmínek prostředí). Dřevo tepelně upraveno, a tudíž dřevo s nižší rovnovážnou vlhkostí, má za daných podmínek větší hustotu a pevnost v ohybu než dřevo tepelně neupravené, jak dokazují hodnoty uvedené v Tab. III.

Plastifikace dřeva pouze přispěla k jeho deformovatelnosti bez zjevného porušení struktury dřeva. Mikrovlnný ohřev použitý k plastifikaci neměl negativní dopad na vlastnosti dřeva ovlivňující jeho mechanické vlastnosti, zejména mez pevnosti a modul pružnosti v ohybu kolmo k průběhu vláken ve směru radiálním.

SOUHRN

Elektromagnetické záření mikrovlnného pásma, díky kterému se dřevo ohřívá, významně neovlivňuje následné lisování dřeva.

Rovnoměrné plošné lisování dřeva zvyšuje jeho hustotu. Při 50% poměru stlačení je tato hustota dvojnásobná oproti původní hodnotě. Hustota neupraveného dřeva smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) Karst.) je $433,74 \text{ kg.m}^{-3}$. Po slisování na poloviční tloušťku ve směru radiálním je jeho hustota $878,76 \text{ kg.m}^{-3}$ při vlhkosti dřeva 0%. Hustota dřeva významně ovlivňuje většinu fyzikálních a mechanických vlastností. Jednou z nich je i mez pevnosti dřeva v ohybu ve směru kolmo na průběh vláken v radiálním směru. Hodnota meze pevnosti po slisování plastifikovaného dřeva je 121,8 MPa (při 12 % vlhkosti). Vysokoteplotní úprava dřeva při 200 °C po dobu čtyř hodin mění jeho chemickou strukturu a s tím spojenou hustotu, jejíž hodnota je po tepelné úpravě vyšší než u dřeva tepelně neupraveného, a to $896,09 \text{ kg.m}^{-3}$. Změní se i mez pevnosti dřeva. Ta je po tepelné úpravě 124 MPa při vlhkosti 12%. Slisované dřevo také vykazuje vyšší tuhost než dřevo neslisované. Modul pružnosti slisovaného smrkového dřeva je 16 475,96 MPa. Po následné vysokoteplotní úpravě dojde k poklesu modulu pružnosti na hodnotu 15 192,92 MPa.

Variabilita souborů vyjádřena směrodatnou odchylkou a rozptyl hodnot výběrových souborů (Tab. I, II, III) vykazují nízké hodnoty, které mají dostatečnou vypovídající hodnotu o daných způsobech modifikace dřeva na změnu modulu pružnosti a meze pevnosti v ohybu kolmo ke směru vláken v radiálním směru.

Změna chemické struktury dřeva v důsledku vysokoteplotní úpravy také ovlivňuje sorpční vlastnosti dřeva. Dlouhodobým uložením dřeva v určitém prostředí dojde k ustálení vlhkosti dřeva v závislosti

na relativní vlhkosti okolního vzduchu a jeho teplotě. Dřevo tepelně upravené má v našem případě o 1,67 % nižší rovnovážnou vlhkost oproti dřevu pouze slisovanému (7,61 %). V závislosti na obsahu vlhkosti se podstatně mění mechanické vlastnosti dřeva. Vysokoteplotně upravené dřevo, jehož vlhkost odpovídá stavu vlhkostní rovnováhy s daným prostředím, má vyšší mez pevnosti v ohybu než dřevo pouze slisované (o dané rovnovážné vlhkosti). Oproti tomu poklesl rozdíl mezi hodnotami modulu pružnosti u obou skupin.

Závěrem lze říci, že dřevo smrku ztepilého, které bylo mikrovlnně plastifikováno a rovnoměrně plošně zhuštěno, má mnohem větší hustotu, mez pevnosti v ohybu kolmo na průběh vláken v radiálním směru a modul pružnosti než nativní smrkové dřevo. Následná vysokoteplotní úprava dřeva přispěla ke zlepšení výše zmíněných vlastností a s ohledem na tyto vlastnosti lze dřevo doporučit k výrobě součástí, které jsou vystaveny velkému namáhání v ohybu kolmo na rovinu desky v radiálním směru, resp. k použití tam, kde je dřevo vystaveno velkému opotřebení.

Picea abies (L.) Karst., mikrovlnná plastifikace, lisování dřeva, mez pevnosti v ohybu, Youngův modul pružnosti, hustota dřeva

SUMMARY

An electromagnetic radiation in microwave range the wood is heated by significantly doesn't cause subsequential compression of wood.

Operations as pressing of wood increase its density. The wood compressed at 50 % of original size has two times bigger density. The density of original Spruce wood (*Picea abies* (L.) Karst.) is 433,74 kg.m⁻³. After compression at half thickness in radial direction the density is 878,76 kg.m⁻³ in 0 % moisture content. The density of the wood has significant influence on most of physical and mechanical properties of wood. One of them is bending strength perpendicular to the grain in the radial direction. The bending strength after compression of plasticized wood is 121,8 MPa (moisture 12 %).

The wood modification in high temperature (200 °C) during 4 hours causes change of chemical structure and due to it also the wood density. The value of density after this thermal treatment is higher than non-high temperature treated wood. The value is 896,09 kg.m⁻³. The bending strength is also changed. After thermal treatment is 124 MPa in 12 % moisture content.

Compressed wood has also higher stiffness than non-compressed wood. Young's modulus of elasticity of compressed Spruce wood is 16 475,96 MPa. After high temperature modification the Young's modulus of elasticity is lower. The value is 15 192,92 MPa.

The change of chemical structure of wood due to high temperature treatment also affects sorption properties of wood. The wood, which is long-term storage in certain environment, has the moisture content corresponding to the relative humidity and temperature of the ambient air. The wood treated in high-temperature has in our case about 1,67 % lower equilibrium moisture content compared to wood only compressed without high-temperature treatment (7,61 %). Moisture content in wood significantly affects mechanical properties of wood. The wood treated by the high-temperature with equilibrium moisture content related to ambient environment has higher bending strength than the wood only compressed under the same conditions (relative humidity and temperature of ambient air).

The Spruce wood, which was microwave plasticized and compressed perpendicular to the grain in the radial direction has much higher density, bending strength and Young's modulus of elasticity than native Spruce wood. Subsequent high temperature modification improved above mentioned properties and due to this we can recommend this kind of Spruce wood to the production of subject to high stress and for using in places, where the wood is exposed to the higher abrasion.

LITERATURA

- BOUJILA, J., DOLE, P., JOLY, C., LIMARE, A., 2006: Some laws in lignin plasticization. *Journal of applied polymer science* 1445–1451 p. ISSN 0021-8995
- CHOVANEK, D., OSVALD, A., 1992: *Thermal degradation of wood*. Zvolen: Technical UNIVERSITY, 59 S. ISBN 80-228-0175-5
- MATOVIČ, A., 1993: *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. Brno: VŠZ Brno, 212 s. ISBN 80-7157-086-9
- POŽGAJ, A., CHOVANEK, D., KURJATKO, S., BABIAK, M., 1993: *Štruktúra a vlastnosti dřeva*. Bratislava: Príroda a. s., 488 s. ISBN 80-0700600-1
- SIAU, J. F., 1995: *Wood: Influence of moisture content on physical properties*. New York: Virginia Polytechnic Institute and State University, 230 p.
- TSUOMIS, G., 1991: *Science and technology of wood; Structure, properties, utilization*. New York: Chapman and Hall, 494 p. ISBN 0-412-07851-1
- ČSN EN 408 Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností

Adresa

Ing. Lukáš Merenda, doc. Ing. Květoslav Nikl, CSc., Ústav nauky o dřevě, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: lmerenda@centrum.cz; knikl@se-znam.cz