

# **SUŠENÍ A MODIFIKACE DŘEVA**

**(UČEBNÍ TEXTY)**

**Aleš Dejmal**

**Brno, 2017**

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD - MODIFIKACE DŘEVA .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>DŘEVO.....</b>	<b>6</b>
2.1	ZDROJE DŘEVA .....	6
2.2	VYUŽITÍ DŘEVA .....	7
2.3	ŘEZIVO .....	7
2.4	CHEMICKÉ SLOŽENÍ DŘEVA.....	8
2.5	STAVBA DŘEVA NA MIKROSKOPICKÉ ÚROVNI .....	9
2.6	STAVBA DŘEVA NA MAKROSKOPICKÉ ÚROVNI.....	10
2.7	VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI DŘEVA.....	10
2.7.1	<i>Objemová hmotnost.....</i>	<i>11</i>
2.7.2	<i>Pórovitost.....</i>	<i>11</i>
2.7.3	<i>Vlhkost.....</i>	<i>11</i>
2.7.4	<i>Propustnost dřeva .....</i>	<i>13</i>
2.7.5	<i>Tepelné vlastnosti dřeva.....</i>	<i>13</i>
2.7.6	<i>Elektrické vlastnosti dřeva .....</i>	<i>14</i>
2.7.7	<i>Optické vlastnosti dřeva .....</i>	<i>14</i>
2.8	VYBRANÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA .....	15
2.8.1	<i>Pružnost dřeva .....</i>	<i>16</i>
2.8.2	<i>Pevnost dřeva.....</i>	<i>16</i>
2.8.2.1	<i>Tlaková pevnost dřeva.....</i>	<i>17</i>
2.8.2.2	<i>Tahová pevnost dřeva.....</i>	<i>17</i>
2.8.2.3	<i>Ohybová pevnost dřeva .....</i>	<i>17</i>
2.8.3	<i>Tvrdomost dřeva .....</i>	<i>18</i>
2.8.4	<i>Ohyvatelnost dřeva.....</i>	<i>18</i>
2.9	ODOLNOST DŘEVA VŮČI BILOGICKÉ DEGRADACI.....	18
2.10	ODOLNOST DŘEVA VŮČI TEPELNÉ DEGRADACI .....	19
<b>3</b>	<b>METODY MODIFIKACE VLASTNOSTÍ DŘEVA.....</b>	<b>21</b>
3.1	SUŠENÍ ŘEZIVA .....	22
3.1.1	<i>Přirozené sušení řeziva .....</i>	<i>23</i>
3.1.2	<i>Umělé sušení řeziva.....</i>	<i>24</i>
3.1.2.1	<i>Umělé předsoušení řeziva.....</i>	<i>25</i>
3.1.2.2	<i>Kondenzační sušení řeziva .....</i>	<i>26</i>
3.1.2.3	<i>Solární sušení řeziva.....</i>	<i>27</i>
3.1.2.4	<i>Teplovzdušné sušení řeziva .....</i>	<i>27</i>
3.1.2.5	<i>Vysokoteplotní sušení řeziva.....</i>	<i>29</i>
3.1.2.6	<i>Dielektrické sušení řeziva při atmosférickém tlaku prostředí .....</i>	<i>30</i>
3.1.2.7	<i>Vakuové sušení řeziva.....</i>	<i>31</i>
3.2	HYDROTERMICKÁ ÚPRAVA DŘEVA .....	32
3.2.1	<i>Paření a vaření dřeva.....</i>	<i>33</i>
3.2.1.1	<i>Plastifikace dřeva pářením a vařením.....</i>	<i>34</i>
3.2.1.2	<i>Změna barvy dřeva pomocí hydrotermické úpravy .....</i>	<i>35</i>
3.2.1.3	<i>Snížení vlhkostního spádu a eliminace zbytkových napětí po sušení .....</i>	<i>36</i>
3.2.1.4	<i>Uvolnění růstových napětí.....</i>	<i>37</i>
3.2.1.5	<i>Sterilizace a zvýšení propustnosti dřeva .....</i>	<i>37</i>
3.2.2	<i>Zařízení pro páření dřeva.....</i>	<i>37</i>
3.2.2.1	<i>Zařízení pro páření řeziva a parketových vlysů .....</i>	<i>38</i>
3.2.2.2	<i>Zařízení pro hydrotermickou úpravu dýhárenských výřezů .....</i>	<i>38</i>
3.2.2.3	<i>Zařízení pro plastifikaci dílců před ohýbáním (lisováním).....</i>	<i>38</i>
3.3	MIKROVLNNÁ MODIFIKACE DŘEVA.....	39
3.3.1	<i>Torgvin.....</i>	<i>40</i>
3.3.2	<i>Vintorg .....</i>	<i>40</i>
3.4	PLAZMATICKÁ MODIFIKACE DŘEVA.....	41
3.5	LISOVÁNÍ DŘEVA .....	42
3.5.1	<i>Lisování dřeva plastifikovaného ve vodní páře ve směru kolmém na dřevní vlákna .....</i>	<i>44</i>
3.5.2	<i>Lisování amoniakem plastifikovaného dřeva .....</i>	<i>45</i>
3.5.3	<i>Izostatické lisování plastifikovaného dřeva.....</i>	<i>46</i>

3.5.4	<i>Lisování plastifikovaného dřeva ve směru rovnoběžném s dřevními vlákny</i>	46
3.6	MODIFIKACE DŘEVA V OBLASTI OH SKUPIN	48
3.6.1	<i>Blokování</i>	48
3.6.2	<i>Sítování</i>	49
3.6.3	<i>Roubování</i>	49
3.6.4	<i>Odbourání</i>	49
3.7	IMPREGNACE DŘEVA	49
3.7.1	<i>Pryskyřice</i>	53
3.7.2	<i>Soli</i>	54
3.7.3	<i>Sacharidy</i>	54
3.7.4	<i>Křemičitany</i>	56
3.7.5	<i>Vosky a oleje</i>	56
3.7.6	<i>Směsi vosků, olejů a pryskyřic</i>	57
3.7.7	<i>Polyetylenglykol (PEG)</i>	58
3.7.8	<i>Dimethyloldihydroxyethylenmočovina (DMDHEU)</i>	58
3.7.9	<i>Furfurylalkohol (FA)</i>	59
3.7.10	<i>Anhydrid kyseliny octové</i>	60
3.7.11	<i>Amoniak</i>	61
3.7.11.1	<i>Úprava barvy dřeva čpavkováním</i>	62
3.7.11.2	<i>Přechodná plastifikace dřeva čpavkováním</i>	63
3.8	TEPELNÁ MODIFIKACE DŘEVA	63
3.9	BIOLOGICKÁ MODIFIKACE DŘEVA	66
3.10	ŠLECHTĚNÍ LESA A GENOVÉ INŽENÝRSTVÍ	68
3.10.1	<i>Šlechtění lesa</i>	68
3.10.2	<i>Genové inženýrství</i>	70
<b>4</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>71</b>
<b>5</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b>	<b>73</b>

# 1 Úvod - Modifikace dřeva

O dřevě se často hovoří jako o surovině, která má za příhodných podmínek schopnost trvale se obnovovat, tedy jako o trvale obnovitelném zdroji. Toto tvrzení však může být do jisté míry zavádějící v tom smyslu, že to může svádět k nešetrnému hospodaření s tímto vzácným surovinovým zdrojem. Pěstování a obnova lesa může být zásadně ovlivněno změnami klimatu a současně může být i jejich příčinou. Neúměrně vysokou spotřebu dřeva může dále zvyšovat nešetrné zacházení s výrobky ze dřeva, které spočívá například ve špatné volbě materiálu, nevhodném konstrukčním řešení, nevhodných podmínkách pro používání, případně v nevyhovující údržbě. Zvýšení trvanlivosti výrobků ze dřeva pomocí modifikace vlastností masivního dřeva, tak alespoň částečně přispívá k omezení neustále rostoucí poptávky po kvalitním dřevě. Otázka prodloužení životnosti výrobků a konstrukcí ze dřeva bez použití chemických látek, zatěžujících životní prostředí, je tak od konce 20. století stále aktuálnější. Cílem tohoto textu je pokusit se poskytnout určitý ucelený a strukturovaný souhrn aktuálních informací a poznatků z oblasti úpravy (modifikace) vlastností masivního dřeva za účelem zvýšení užitné hodnoty produktů ze dřeva, používaných v našich podmínkách. A to zejména z pohledu informací dostupných na začátku 21. století. Za trvale aktuální jsou zde považovány i dlouhodobě platné obecné zásady a principy ověřené v minulosti.

Tato publikace se soustřeďuje především na v současné praxi rozšířené materiály a způsoby modifikace, při kterých byly upraveny materiálové vlastnosti na průřezu masivního dřeva, případně na materiály a technologie, které v praxi prozatím rozšířeny nejsou, ale o něž se velmi zajímá určitá část odborné veřejnosti a považuje je tedy zřejmě za perspektivní. Určitou výjimku tvoří popis použití plazmatu v průmyslu zpracování dřeva. Plazma by mohlo být považováno také jako prostředek pro povrchovou úpravu dřevěných dílců. Naopak zcela záměrně je vynechána chemická ochrana dřeva, při níž se uplatňují biocidní ochranné prostředky. Vzhledem k tomu, že i při sušení a hydrotermické úpravě dřeva vařením nebo pářením dochází k trvalým nebo přechodným změnám vlastností dřeva, jsou do uváděného přehledu naopak zahrnuta i tato témata, která v odborné literatuře v oblasti modifikací zpravidla uváděna nejsou (Teischinger 2002, Hill 2006). Aby bylo možné hovořit o změnách, ke kterým v průběhu modifikace dochází, bude v další části textu krátká informace týkající se stavby, chemického složení a vlastností nativního dřeva.

S vědeckým zkoumáním metod úpravy vlastností dřeva se začalo experimentálně ve 20. a 30. letech 20. století (Kollmann 1951, FPL 1999, Kamke 2008, FPL 2010). S ohledem na změny v surovinové základně, v sociálních a ekonomických podmínkách se koncem 20. století aktivita specialistů v oblasti úpravy (zušlechťování) vlastností dřeva výrazně zvýšila. Neustálá zákonná restrikce konvenčních způsobů chemické úpravy dřeva v souvislosti s rostoucím významem ochrany životního prostředí, neustále se zvětšující lidská populace a zvyšující se spotřeba dřeva na osobu znamenají zásadní přehodnocení ve využívání tohoto obnovitelného zdroje. Patrná je snaha specialistů o co nejefektivnější modifikaci a využití dřevní suroviny s minimální zátěží životního prostředí. V důsledku nových podnětů a za pomoci moderních technologií jsou v rámci oblasti modifikace vlastností dřeva vyvíjeny moderní postupy, díky kterým získává dřevo nové vlastnosti a eliminují se škodlivé látky (ECWM 2003, Homan 2004, BRE 2005, Hill 2006, Gabrielli 2008).

Přes řadu nesporných výhod má dřevo i některé horší vlastnosti. Mezi ty nejzmiňovanější patří poměrně malá biologická odolnost, nízká tvrdost, vysoká opotřebitelnost a značné rozměrové změny spojené se změnou vlhkosti v okolním prostředí. V současnosti je stále větší pozornost věnována eliminaci působení negativních vnějších vlivů a udržení nebo dokonce zlepšení pozitivně vnímaných vlastností dřeva. Tento preferovaný směr modifikace dřeva je charakterizován snahou o:

- zachování vlastností, které jsou na dřevě oceňovány (pružnost, pevnost, nízká hmotnost, snadná a dobrá obrobiteľnosť, možnosť lepení a finalizace),
- eliminaci negativních vlastností, které se při jeho využívání projevují (opotřebiteľnosť, navlhavost, rozměrová nestálost, malá odolnosť vůči působení vnějších vlivů),
- snížení spotřeby chemických ochranných fungicidních a insekticidních prostředků (omezení používání látek zatěžujících životní prostředí),
- náhradu exotických dřev tuzemskými (záchrana tropických pralesů, které ovlivňují celosvětové klima,
- lepší využití domácí obnovitelné suroviny,
- vyšší konkurenceschopnosť domácích produktů (ECWM 2003).

## 2 Dřevo

Dříve než budou popsány nejčastěji zmiňované procesy úpravy vlastností dřeva, je vhodné se alespoň krátce zmínit o surovině, které se modifikace týká. V tomto případě bude pozornost věnována především dřevu získanému ze stromů, které rostou v našich klimatických podmínkách, a které je od dávných časů využíváno člověkem, žijícím na našem území. Dřevo je poměrně snadno dostupný přírodní „polotovár“, který lidstvo využívá po celou dobu své existence jako surovinu pro produkci široké škály chemických látek i materiál pro výrobu různých artefaktů, ale i jako zdroj tepla. Dřevo zůstává i v dnešní přetechnizované době jednou z nejvýznamnějších tuzemských surovin. Díky svým specifickým vlastnostem je dlouhodobě jedním z nepoužívanějších materiálů. V době dnes již permanentní surovinové krize je tato obnovitelná, poměrně dostupná domácí surovina, ještě významnější. Zpracované dřevo vydrží ve vhodných podmínkách v téměř nezměněném stavu po velmi dlouhou dobu. Důkazem toho jsou různé historické stavby a užité předměty, umělecké předměty nebo hudební nástroje. Charakteristické vlastnosti, jako je pevnost, pružnost, nízká objemová hmotnost a snadná obrobitelnost, předurčují dřevo pro různá odvětví a obory od zemědělství, stavebnictví, dopravu až po průmysl. Využití dřeva generacemi lidí má s postupem času měnící se podobu a další nové způsoby jeho uplatnění neustále přibývají. Původní využití pro naplnění běžných požadavků člověka se rozšířilo až na současnou aplikaci dřevní suroviny ve výrobě kompozitních materiálů, speciálních papírů, buničiny, celulózy a dalších produktů pro chemický průmysl i energetické účely (Požgaj 1997, MZČR 2010).

### 2.1 Zdroje dřeva

Víc jak 33 % rozlohy naší země tvoří lesy. V posledních dekádách se výměra lesů, patrně díky částečnému zalesňování zemědělské půdy, neustále mírně zvyšuje. Z důvodu snahy lesníků o zvýšení druhové diverzity struktury lesů České republiky klesá podíl jehličnatých dřevin, zejména smrku. Dlouhodobě však jehličnaté porosty (69 %) převažují nad porosty listnatými (14 %). Zbylou část tvoří porosty smíšené. Z hlediska následného zpracování dřevní hmoty je skladba lesa velmi důležitá. U lesů hospodářsky využívaných hraje významnou roli vegetační doba. Například u smrkových porostů je to 60 až 100 let, kdežto u dubových je to až 165 let. U smíšených lesů je z hlediska těžby nutno zpravidla vyčkat na optimální věk celého porostu. Dřevinná skladba by měla být určitým kompromisem mezi skladbou přirozenou (ekologicky významnou) a skladbou výhodnou z pohledu ekonomického využití lesní produkce. Jakákoliv rychlá změna dřevinné skladby by se neobešla bez ztrát a ekologických rizik. Věková struktura našich lesů je značně nerovnoměrná. Průměrný věk porostů v našich hospodářských lesích je okolo 60-ti let. S ohledem na různé kalamity a živelné pohromy, které naši oblast v minulosti postupně zasáhly, a nutnost přednostní těžby kalamitního dřeva, převažují v současnosti porosty staršího věku. V případě vytěžení dřeva v mýtním věku tak vzroste podíl mladších porostů. To pravděpodobně negativně ovlivní možnosti využití dřeva v budoucnosti (MZČR 2010). Celkové roční dodávky surového dříví dosud činily okolo 15 mil. m<sup>3</sup>. Z toho převážnou část tvořily dodávky jehličnatého dříví. S ohledem na druhovou a věkovou skladbu lesů bude tento stav zřejmě po určitou dobu ještě přetrvávat. Zajímavou roli v dostupnosti surového dříví hraje import a export. Prozatím převažuje vývoz nad dovozem. V důsledku výstavby nebo modernizace tuzemských zpracovatelských provozů se ale v současnosti místní poptávka po domácí dřevní surovině neustále zvyšuje. Pokles vývozu surového dříví tak může být z tohoto pohledu vnímán spíše pozitivně. Důležitou roli hraje také globalizace světového obchodu se dřevem. Tento faktor významně ovlivňuje ceny a dostupnost průmyslového dřeva a řeziva i u nás.

## 2.2 Využití dřeva

Nativní dřevo lze využít pro různé účely, jak pro jeho dobré mechanické a fyzikální vlastnosti, tak z hlediska chemického složení. Dřevo lze štípat, sekát, řezat, ohýbat, lisovat, vrtat, dlabat, brousit, lepit, napouštět, povrchově upravovat a vyrábět z něj nejrozmanitější artefakty od jednoduchých dřevěných klínů a násad až po složité stavby, strojní mechanismy nebo umělecká díla. Dřevo lze také vařit, pařit, termicky a chemicky upravovat nebo z něj získávat různé chemické látky. Pomocí určitých postupů lze měnit tvar, ale i chemické složení masivního dřeva. Aby bylo zpracování a využití dřeva co nejefektivnější, je nutné znát jeho stavbu, chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti. Možnosti úpravy vlastností dřeva jsou široké. Například eliminovat nežádoucí rozměrové změny dřeva, v souvislosti se změnou vlhkosti prostředí v jeho okolí, lze v současnosti hned několika způsoby: úpravou jeho vlhkosti na vlhkost odpovídající vnějším podmínkám (sušení, klimatizace), impregnační látkou zvyšující hydrofobnost, impregnační chemickou látkou, měnící počet volných hydroxylových skupin nebo snížením rovnovážné vlhkosti dřeva pomocí vysoké teploty. Dobrá pružnost a pevnost dřeva v porovnání s jeho objemovou hmotností dělá z tohoto materiálu jednu z nejžádanějších surovin. Dřevo má výborné tepelně izolační a tlumící účinky. Využívány jsou i jeho vynikající akustické a rezonanční vlastnosti. Dřevo lze přechodně plastifikovat a lisovat nebo ohýbat. Některá dřeva obsahují látky, které zvyšují jejich přirozenou odolnost (pryskyřice, oleje, třísloviny). Velmi charakteristická je barva, odstín i kresba dřeva, specifické jsou i subjektivní pozitivní pocity při dotyku lidské pokožky s tímto materiálem. Dřevo se dobře obrábí, lepí a povrchově dokončuje. Pokud se výrobky ze dřeva stanou nepotřebnými, je jejich likvidace poměrně snadná a nezatěžuje extrémně životní prostředí. Dřevo má, bohužel, i některé negativní vlastnosti. Je materiálem poměrně nesourodým s odlišnými vlastnostmi v různých anatomických směrech (ortotropnost dřeva). Obsahuje poměrně značné množství míst s odlišnou strukturou (odklon vláken, suky, reakční dřevo). Pokud pomineme energetické využití, je značnou nevýhodou dřeva jeho hořlavost. Dalším nedostatkem je to, že v souvislosti se změnou vlhkosti v okolním prostředí dřevo přijímá nebo odevzdává vlhkost a současně s tím významně mění svoje rozměry (sesychání, bobtnání). Ihned po skácení zdravého stromu tak může být dřevo poškozeno vznikem výsušných trhlin. Poměrně výraznou nevýhodou dřeva je, že se snadno opotřebovává a stlačuje. Dřevo je častým terčem ataku bakterií, plísní, dřevozbarvujících a dřevokazných hub a hmyzu. Tato negativa jsou příčinou poměrně vysokých ztrát na dřevní hmotě a snižují tak dobu využití dílců a výrobků ze dřeva (Trebula 1996, Požgaj 1997, Horáček 2008). Díky cílené úpravě (modifikaci) některých z výše uvedených vlastností, může dojít k lepšímu využití dřeva a snížení případných ztrát. Modifikaci dřeva není z dnešního pohledu míněno pouze zvýšení odolnosti dřeva vůči biotickému poškození pomocí fungicidních a insekticidních látek, ale všeobecně se jedná o potlačení negativně vnímaných vlastností dřeva a udržení nebo dokonce zlepšení stávajících pozitivně hodnocených vlastností dřeva, či získání vlastností zcela nových (ECWM 2003, Hill 2006).

## 2.3 Řezivo

Výchozím materiálem, jehož vlastnosti jsou pomocí různých procesů upravovány je zpravidla řezivo. Vzniká podélným rozřezáním jehličnaté nebo listnaté kulatiny nebo výřezů v pilařském provozu. Výrobní proces sestává z určitých etap. V první se nejčastěji připravuje a třídí kulatina podle druhu, rozměrů a kvality. Ve druhé probíhá podélné dělení pilařských výřezů na polotovary. Následuje prefabrikace řeziva na konstrukční přířezy nebo dílce. Součástí celého procesu je i průmyslové zpracování odpadu, realizované s ohledem na jeho další využití. Podélným rozmítáním kmene (pořezem) pomocí rámových, pásových nebo kotoučových pil se vyrábí polotovary stejných nebo podobných rozměrů. Termín pořez charakterizuje hromadnou výrobu neopracovaného řeziva a pražců.

Řezivo lze dělit podle způsobu výroby na neomítané a omítané. Podle tvarů a rozměrů příčného průřezu na deskové, hraněné a polohraněné. Neomítané řezivo má rovnoběžné plochy a jeden nebo dva neopracované boky. Omítané řezivo se může vyrábět rovnoběžným opracováním neomítaného řeziva a je definováno jako řezivo s pravoúhlým příčným průřezem. Zpracování záleží na zvoleném způsobu pořezu.

Deskové řezivo zahrnuje omítané i neomítané řezivo o tloušťce do 100 mm, jehož šířka je rovná nebo je větší než dvojnásobek tloušťky. Mezi deskové řezivo patří prkna s tloušťkou menší než 40 mm, fošny s tloušťkou 40 až 100 mm a krajiny - vnější části výřezu, které mají na jedné straně rovnou řeznou plochu a na druhé oblý povrch původní kulatiny.

Hraněné řezivo pravoúhlého příčného průřezu, jehož šířka je menší než dvojnásobek tloušťky se podle plochy příčného průřezu dělí na hranoly s tloušťkou větší než 100 mm nebo s plochou příčného průřezu větší než 100 cm<sup>2</sup>, hranolky s tloušťkou nejvýše 100 mm a s plochou příčného průřezu 25 až 100 cm<sup>2</sup>, latě s plochou příčného průřezu 10 až 25 cm<sup>2</sup> a lišty s plochou příčného průřezu menší než 10 cm<sup>2</sup>.

Polohraněné řezivo je dvoustranně řezané řezivo o šířce menší než je dvojnásobek tloušťky s oblými boky. Podle tloušťky se dělí na polštáře s tloušťkou nejvýše 100 mm a trámy o tloušťce větší než 100 mm a s nejmenší šířkou, která odpovídá 2/3 tloušťky (Palovič 1981, Janák 2004, ČSN P CEN/TS 12169 (49 1202), ON 12 6012).

#### **2.4 Chemické složení dřeva**

Po chemické stránce obsahuje sušina dřeva z 50 % uhlík, ze 44 % vodík, a zbylých 6 % představuje kyslík. Dřevo tvoří z velké části organické sloučeniny, malé zastoupení mají anorganické (minerální) látky. Jednotlivé stavební elementy dřeva jsou tvořeny z polymerů celulózy (43 až 52 %), hemicelulóz (20 až 35 %) a ligninu (20 až 30 %).

Z chemického hlediska je dřevo biopolymer, skládající se z hydrofilní sacharidové složky (celulóza, hemicelulózy) a hydrofobní aromatické složky (lignin). Celulóza je základní strukturální jednotkou buněčné stěny dřeva. Čím větší je polymerační stupeň řetězce celulózy, tím vyšší je pevnost dřeva. Poměrně dlouhé řetězce celulózy probíhají přes krystalická i amorfní místa. Celulóza je hygroskopická a snadno přijímá vodu. Voda, která proniká do buněčných stěn se soustřeďuje především v amorfních oblastech a na povrchu krystalických částí. Celulóza je chemicky poměrně velmi stálá. Existují však mikroorganismy, které ji umějí rozložit na jednoduché cukry a energeticky využít. Tyto mikrobiální procesy se projevují při hnití nebo tlení dřeva. Hemicelulózy mají v porovnání s celulózou kratší řetězce s menší molekulovou hmotností a jsou ze dřeva snadněji hydrolyzovatelné. Většinou se vyskytují v amorfní formě. Hemicelulózy významně ovlivňují chemické a fyzikální vlastnosti dřeva. Lignin se podílí na zdřevnatění buněčných stěn. Je to rozvětvený amorfní polymer, skládající se z fenylypropanových jednotek. Není tvořen ze sacharidů jako celulóza, ale převážně z aromatických alkoholů. Díky tomu není hydrofilní (navlhavý). Má o něco větší výhřevnost než celulóza. Při působení vyšších teplot je chemicky stabilnější než celulóza a hemicelulózy. Stává se však postupně stále více plastickým. Doprovodné organické složky jako terpeny, tuky, vosky, pektiny, bílkoviny, třísloviny, steroly a pryskyřice v zastoupení 1 až 3 % jsou označovány jako extraktivní (akcesorické) látky. Je známo, že jehličnatá dřeva obsahují 0,5 až 1,5 % acetylových skupin a listnatá 2 až 4,5 %. Velmi malý podíl (0,1 až 0,5 %) tvoří extraktivní anorganické látky, které po spálení dřeva tvoří popel. Zbylou část představuje voda (Kollmann 1951, Bučko 1988, Požgaj 1997).

Struktura a chemické složení dřeva se zpravidla popisuje na třech úrovních. Na úrovni makroskopické, mikroskopické a submikroskopické. Odlišnosti ve stavbě buněčné stěny a chemické složení charakterizují submikroskopickou stavbu dřeva. Její zkoumání je možné pouze pomocí speciálních mikroskopů s vysokou rozlišovací schopností nebo díky chemické analýze.



## 2.5 Stavba dřeva na mikroskopické úrovni

Dřevo je rostlinné pletivo skládající se z jednotlivých buněk, které podle tvaru a orientace plní v rostoucím stromě různé specifické funkce. Část z těchto funkcí se následně přenáší i do produktů ze dřeva vyrobených. Tělo buněk dřeva tvoří buněčná stěna, skládající se z vrstev odlišných jak strukturou tak i chemickým složením. Jednotlivé buněčné stěny jsou spojeny střední lamelou, která je tvořena z převážné části ligninem. Jeho stavba je ve střední lamelle odlišná od stavby v rámci buněčné stěny. Buněčnou stěnu tvoří primární stěna a třívrstvá sekundární stěna. Primární stěna je chemicky blízká střední lamelle a má neuspořádanou strukturu, připomínající kyprou hmotu. Jako sekundární se označuje část buněčné stěny, která je blíže k lumenu buňky. V jejím středu je z pohledu mechanických a fyzikálních vlastností dřeva nejdůležitější vrstva, složená z hustě uložených celulózových fibril, které jsou orientovány podoně jako dřevní vlákna. To způsobuje vysokou tahovou pevnost dřeva ve směru vláken a významně ovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva. Podle funkce se jednotlivé anatomické elementy dřeva dělí na mechanické, vodivé a zásobní.

Důležitou částí buněčných stěn, která zajišťuje transport tekutin mezi buňkami jsou ztenčeniny. Podle charakteristické stavby rozlišujeme jednoduché ztenčeniny – tečky a dvojtečky jehličnatých dřevin a dvojtečky listnatých dřevin (Kollmann 1951, Požgaj 1997, FPL 1999, Gandelová 2002, Horáček 2008).

Mikroskopickou stavbu dřeva je možné sledovat pouze po několikanásobném zvětšení pomocí běžné zvětšovací mikroskopické techniky. Jehličnaté dřeviny jsou vývojově starší a mají jednodušší mikrostrukturu než dřeviny listnaté. Základními stavebními elementy jehličnatého dřeva, zabírajícími až 90 % celkového objemu jsou cévice – tracheidy. Tracheidy plní v rostoucím stromě jak vodivou, tak mechanickou funkci. Dřeňové paprsky a pryskyřičné kanálky jsou tvořeny parenchymatickými buňkami. Jarní tenkostěnné tracheidy mají především vodivou funkci, letní tlustostěnné tracheidy poskytují převážně funkci mechanickou. Dřeň jehličnatých dřevin tvoří tenké nezdřevnatělé buňky, které v mladém věku obsahují škrob a pryskyřici, později jsou zpravidla prázdné. Například u smrkového dřeva torus ztenčeniny v jarním dřevě přilehne při sušení velmi těsně k porusu, což ztěžuje následnou impregnaci. Propustnost borového dřeva naopak pozitivně ovlivňuje bradavičnatá vrstva na vnitřním povrchu buněčné stěny. Dvojtečky u listnatého dřeva jsou menší a nemají torus. Propustnost dřeva pro některé látky se může trvale výrazně zhoršit vlivem snížení vlhkosti (sušení). Obdobně na propustnost negativně působí přítomnost tyl a jádrových nebo zásobních látek v některých buňkách dřeva (Kollmann 1951, Wagenfür 1977).

Listnaté dřeviny, které mají složitější strukturu jsou tvořeny více druhy úzce specializovaných dřevních buněk. U listnatých dřev došlo k rozdělení mechanické a vodivé funkce mezi libriformní vlákna a tracheje (cévy). Tenkostěnné cévy – tracheje listnatých dřevin, vytvořené spojením jednotlivých cévních článků, plní pouze funkci vodivou. V jarním dřevě kruhovitěporovitých dřevin jsou cévy nejširší. Cévy mohou být zneprůchodněny vakovitými útvary – thylami, tvořenými parenchymatickými buňkami (dub). Cévice (tracheiny) listnatého dřeva se dělí na cévovité (přechod mezi cévami a cévicemi), vazicentrické (nemohou samostatně vytvářet vodivé cesty) a vláknité (přechod mezi tracheinou a libriformním vláknem). Mechanickou funkci v listnatých dřevinách plní sklerenchymatická - libriformní vlákna vřetenovitého až trubičkovitého tvaru se silnější buněčnou stěnou. Zásobní buňky dřeňových paprsků jsou tvořeny válečkovým dřevním parenchymem v horizontálním směru, ve směru vertikálním je těmito buňkami vytvořen axiální dřevní parenchym (Gandelová 2002).

## 2.6 Stavba dřeva na makroskopické úrovni

Pouhým okem můžeme na příčném řezu kmenem v jeho středu pozorovat zpravidla tmavěji zbarvenou několikamilimetrovou dřeň. Výjimkou je například bříza, u které je dřeň pouhým okem těžko rozlišitelná. Dále jsou na příčném řezu u našich dřevin (dřevin mírného podnebného pásu) viditelné jednotlivé letokruhy. Letokruh je přírůstek dřeva vytvořený v průběhu vegetačního období jednoho roku. Jehličnatá dřeva mají v rámci letokruhu výrazně tmavší a až třikrát tvrdší vrstvu letního dřeva s vyšší objemovou hmotností. Jarní dřevo letokruhu je světlejší a měkčí. Listnatá kruhovitěpórovitá dřeva mají jarní dřevo s výraznými velkými póry. Nejpravidelnější strukturu mají z tohoto pohledu roztroušeněpórovitá dřeva. Letokruhy se odlišují velmi tenkou vrstvičkou pozdního letního dřeva. Šířka letokruhů je typická pro jednotlivé dřeviny a závisí na vnějších podmínkách v nichž strom žije. Kromě rozdílů v barvě a odstínu v rámci letokruhů lze na příčném řezu sledovat ještě podstatně větší barevně odlišené plochy. Dřevo může mít kupříkladu ihned po skácení stromu na celém příčném řezu stejný odstín nebo mohou být patrně barevně odlišené zóny. Jedná se o běl, vyzrálé dřevo a jádro. Bělové dřeviny jsou typické tím, že mají jak po skácení, tak po vysušení na celé ploše stejný odstín (javor, olše, bříza, hrušeň). Dřeviny s vyzrálým dřevem mají na příčném řezu kmenem po skácení po obvodu viditelnou tmavší zónu, která obsahuje větší podíl vody. Po vysušení rozdíl v odstínu barvy dřeva zmizí (smrk, jedle, lípa, buk). Propustnost obou částí dřeva však zůstává různá i po vysušení. Existuje skupina dřevin - dřeviny s jádrem, které mají ve středové části výrazně tmavší část – jádro a po obvodu světlejší běl (borovice, modřín, dub, akát, jasan, jilm, topol, vrba). Jádro, které obsahuje jádrové látky (pryskyřice, gumy, alkaloidy) je špatně propustné. U některých bělových dřevin a dřevin s vyzrálým jádrem se může (buk) vyskytnout nepravé jádro. Jedná se zpravidla o nepravidelný tvar ve střední části, který vzniká jako obrana stromu po poškození, kdy dochází k oxidaci tříslovin a tvorbě thyl. Bělová zóna dřeva vede vodu s minerálními látkami a pomáhá ukládat zásobní látky. Šířka běle je charakteristická pro jednotlivé dřeviny v mýtním věku. Po vysušení se může odstín, dokonce i barva, částí dřeva výrazně změnit (olše) oproti odstínu těsně po skácení stromu. Na výslednou barvu dřeva může mít následně vliv způsob, čas a teplota sušení. Rozvádění produktů asimilace ve dřevě rostoucího stromu zajišťují dřeňové paprsky. U většiny dřev jsou na příčném řezu viditelné jako lesklé paprsky sbíhající se od lýka směrem ke středu. Všechny nemusí končit až u dřeně. Na radiálním řezu potom tvoří lesklé plošky nebo pruhy různých rozměrů, typické pro jednotlivá dřeva (dub). U většiny našich jehličnatých dřevin se vyskytují horizontálně i vertikálně uložené, vzájemně propojené kanálky, které obsahují pryskyřici – pryskyřičné kanálky. Pryskyřice má ochrannou a impregnační funkci. Pouhým okem jsou také viditelné cévy listnatého dřeva. Jsou to stavební elementy, jejichž funkcí je v rostoucím stromě vést vodu od kořenů až do koruny stromu k jednotlivým asimilačním orgánům. Na podélném řezu tvoří rýhy, na příčném otvory (póry) (Lysý 1961, Požgaj 1997, Gandelová 2002). Užší póry v letním dřevě letokruhu mohou tvořit různé typické skupiny a obrazce. Ve struktuře dřeva mají svůj význam zdravé zarostlé suký. Tmavší barva suků je dána hustějšími letokruhy. Suky mají jinou orientaci dřevních vláken a jinou objemovou hmotnost než okolní dřevo. Letokruhy dřeva v okolí suků vytvářejí v důsledku odklonu vláken specifickou kresbu. Z důvodu dlouhodobého jednosměrného zatížení vzniká v rostoucích stromech dřevo s větší objemovou hmotností - reakční dřevo. U jehličnatých dřev tvoří na příčném řezu tmavší měsíčky na tlakové straně. Naopak u listnatých dřev se projevuje přítomnost reakčního dřeva světlejším zbarvením na tahové straně. Obdobně jako suký zvyšuje reakční dřevo nehomogenost dřeva.

## 2.7 Vybrané fyzikální vlastnosti dřeva

Vlastnosti dřeva lze rozdělit na fyzikální a mechanické. Pomocí hodnocení těchto vlastností lze potom porovnávat významné rozdíly mezi jednotlivými druhy dřev. Mezi fyzikální vlastnosti

dřeva počítáme např. objemovou hmotnost, pórovitost, vlhkostní vlastnosti, tepelné vlastnosti, elektrické vlastnosti, akustické a optické vlastnosti (Kolman 1951, Matovič 1993, Horáček 2008).

### **2.7.1 Objemová hmotnost**

Objemová hmotnost dřeva udává hmotnost objemové jednotky v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  nebo v  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Velmi výrazně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Těžké dřevo s větší objemovou hmotností je například tvrdší, pevnější a méně se mechanicky opotřebuje než dřevo lehké s nízkou objemovou hmotností. Poměr nízké hmotnosti a vysoké pevnosti dřeva je důležitý například při využití dřeva ve stavebnictví. Objemovou hmotnost dřeva ovlivňuje vlhkost, šířka letokruhů, podíl letního dřeva v letokruhu, poloha v kmeni a věk stromu. S růstem vlhkosti se mění objemová hmotnost dřeva. Se zvyšováním vlhkosti se až do meze hygroskopicity mění objem dřeva. Po dosažení meze hygroskopicity se objem nemění, hmotnost dřeva však roste až do úplného nasycení vodou. U jehličnatých dřev objemová hmotnost roste s poklesem šířky letokruhu v důsledku vyššího podílu letního dřeva, ale u většiny listnatých dřev je tendence spíše opačná. Pro jehličnatá dřeva platí, že směrem k obvodu kmene se objemová hmotnost zvyšuje. U listnatých dřev je variabilita vyšší. S výškou kmene se objemová hmotnost zpravidla snižuje. Objemová hmotnost reakčního tlakového dřeva jehličnatých dřev je až 1,5 krát vyšší oproti okolnímu dřevu. Reakční tahové dřevo listnatých dřev nevykazuje tak výrazné rozdíly (Kollmann 1951, Požgaj 1997, FPL 1999, Horáček 2008).

### **2.7.2 Pórovitost**

Pórovitostí vyjadřujeme objem pórů v jednotkovém objemu dřeva. Za póry jsou v tomto případě považovány dutiny, které tvoří lumény dřevních buněk, mezibuněčné prostory s poloměrem kapilár větším jak 100 nm a dutiny, které jsou v buněčných stěnách a mají velikost poloměru do 100 nm. Celková pórovitost se vyjadřuje objemem pórů v jednotkovém objemu absolutně suchého dřeva (Kollmann 1951, Horáček 2008). Problémem je, že s růstem vlhkosti do meze hygroskopicity dřevo bobtná (zvětšuje rozměry). Je nutno brát v úvahu, že se zvyšováním vlhkosti do meze hygroskopicity se pórovitost dřeva zvyšuje. Pórovitost je velmi důležitá z hlediska rychlosti sušení, možnosti slisování nebo impregnace dřeva.

### **2.7.3 Vlhkost**

Ve dřevě stromu se již v průběhu růstu nachází značné množství vody, která je bezpodmínečně nutná pro existenci stromu, jako živého organismu. Po skácení stromu se začne s ohledem na okolní podmínky obsah vlhkosti obsažené ve dřevě zpravidla snižovat. Množství vody, která se nachází ve dřevě označujeme jako vlhkost dřeva. Vyjadřuje se poměrem hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva. V tomto případě se hovoří o absolutní vlhkosti dřeva. Z pohledu sušení dřeva nás zajímá právě tato vlhkost. Pokud je vlhkost vyjádřena poměrem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva při určité vlhkosti, potom se jedná o vlhkost relativní. Ta je důležitá zejména při nákupu dřevní suroviny pomocí váhové přejímky.

Vodu ve dřevě dělíme na volnou a vázanou. Voda volná (kapilární) vyplňuje buněčné lumény a mezibuněčné prostory a ve dřevě je vázána kapilárními silami. Množství vody volné se pohybuje od meze hygroskopicity až po úplné nasycení dřeva. S ohledem na objem pórů může být vlhkost dřeva vyšší jak 100 %. Voda vázaná je obsažena v buněčných stěnách. Na dřevo je poutána pomocí vodíkových (hydroxylových) vazeb. Počet volných reaktivních OH skupin lze pomocí různých postupů upravit (modifikovat). To může mít vliv na změnu rovnovážné vlhkosti modifikovaného dřeva. Voda vázaná je ve dřevě v rozmezí od 0%

vlhkosti až do meze hygroscopicity. Příjem nebo odevzdávání vlhkosti v oblasti vody vázané jsou spojeny s rozměrovými změnami - bobtnáním nebo sesycháním. Také v tomto případě se projevuje rozdílnost ve velikosti rozměrové změny ve směru tangenciálním, radiálním a podélném (20 ku 10 ku 1).

Dřevo je hygrokopický materiál, který je schopný měnit svoji vlhkost v závislosti na relativní vlhkosti a teplotě okolního vzduchu. Mez hygroscopicity (MH) je potom stav, kdy dřevo obsahuje vodu vázanou pouze v buněčných stěnách. Je to hranice, kdy dřevo dosáhne maximálního nasycení buněčných stěn vodou vázanou při 100% relativní vlhkosti okolního vzduchu (Stamm 1964, Babiak 1990). Snižování vlhkosti pod mez hygroscopicity má vliv na zvyšování pevnosti dřeva. Pokud bude dřevo o vysoké vlhkosti v podmínkách s nízkou relativní vlhkostí, bude část vlhkosti odevzdávat do suchého prostředí. Proces se nazývá desorpce. Opačným případem je příjem vodní páry z vlhkého okolí – sorpce (adsorpce). Příjem a odevzdávání vlhkosti neprobíhá za identických podmínek po stejné trajektorii. Rozdíl mezi vlhkostí dřeva při desorpci a sorpci bývá označován jako hystereze sorpce. Je zajímavé, že ve většině případů modifikace dřeva na úrovni buněčné stěny se hodnoty rovnovážné vlhkosti na sorpční izotermě sníží, hystereze sorpce však zůstává téměř beze změny. Vysvětlení rozdílných hodnot sorpční izotermy pro adsorpci a desorpci je poměrně obtížné a bývá vysvětlováno několika teoriemi: teorií rozdílného počtu sorpčních míst při sorpci a desorpci, teorií kónických pórů a teorií hygroelastického efektu, kdy při sorpci vzniká v povrchových vrstvách tlakové napětí a při desorpci napětí tahové (Požgaj 1997, Horáček 2008). Po určité době dojde v prostředí s konstantními podmínkami k dosažení takového stavu, kdy není vlhkost dřevem ani přijímána ani odevzdávána. Tento stav se nazývá stav vlhkostní rovnováhy (SVR). Závislost rovnovážné vlhkosti dřeva na relativní vlhkosti vzduchu při konstantní teplotě znázorňuje křivka zvaná sorpční izoterma. Při sorpci jsou molekuly vodní páry zachytávány přitažlivými silami vodíkových vazeb sorpčních míst buněčné stěny dřeva. Sorpce vody dřevem je doprovázena uvolňováním tepla, které se nazývá teplem sorpce (sorpčním teplem). Naopak odvádění vlhkosti ze dřeva (desorpce) je spojeno s potřebou tepla na uvolnění vazeb mezi dřevem a vodou. Rozlišujeme monomolekulární sorpci, polymolekulární sorpci a kapilární adici. V případě monomolekulární adice je vazba mezi molekulou vody a dřevem nejpevnější. Při sušení dřeva je k jejímu porušení potřeba největší množství tepla. S rostoucí vlhkostí se množství energie potřebné na odpaření vody snižuje. Při sušení dřeva o vlhkosti nad MH se spotřeba tepla nejnížší. Pohyb vody vázané ve dřevě je definován pojmem difúze. Tato difúze souvisí se změnou vlhkosti dřeva. Jakmile se ve struktuře dřeva vyskytnou dvě místa s rozdílnou vlhkostí, je tím vyvolán pohyb vlhkosti, díky kterému dochází k vyrovnání této disproporce. Voda se začne pohybovat do místa s nižší koncentrací. Podle I. Fickova zákona je hustota toku vody přímo úměrná gradientu koncentrace. Kromě rozdílné koncentrace mohou být příčinou pohybu (přenosu) vody vázané rozdíly v chemickém potenciálu, vlhkosti, teplotě a tlaku (Siau 1984). Vlhkost se pohybuje ve směru nižší teploty a nižšího tlaku. V souvislosti s pohybem vlhkosti se zmiňuje stacionární a nestacionární difúze. Pro stacionární difúzi je charakteristické, že rozložení koncentrace není závislé na čase. To znamená, že vnější podmínky jsou v čase neměnné (Kurjatko 1997). V oblasti zpracování dřeva, zejména při sušení se však častěji vyskytují podmínky měnící se v čase. Tyto podmínky jsou charakteristické pro nestacionární difúzi. Nestacionární difúzi popisuje II. Fickův zákon. Při nestacionární difúzi se zpravidla předpokládá konstantní rozložení koncentrace na začátku procesu. Dále musí být charakterizovány poměry na povrchu desky. Pro zjednodušení tohoto případu mají zkušební tělesa tvar desky. Problém pak může být popisován v rámci jednorozměrného řešení. Nestacionární metoda stanovení difúze spočívá ve vážení zkušebních těles uložených v daném prostředí a zjišťování koeficientu prostupu a koeficientu difúze. Koeficient difúze roste s vlhkostí dřeva exponenciálně, také teplota má vliv na zvýšení

koeficientu difúze (Stamm 1964). Na velikost difúze má vliv i anatomický směr. Protáhlé lumény buněk, které jsou převážně orientovány v podélném směru ovlivňují pozitivně difúzi vodní páry v tomto směru. Vodivost v radiálním směru významně ovlivňují dřevové paprsky. Obecně platí, že koeficienty difúze v základních anatomických směrech podélném (L), radiálním (R) a tangenciálním (T), jsou přibližně dány poměrem 35 / 3 / 2 (Siau 1984, Horáček 2008).

#### **2.7.4 Propustnost dřeva**

Objemový tok tekutin přes strukturu dřeva způsobený vlivem vnějšího tlaku se nazývá propustnost dřeva. Tento hydrodynamický pohyb může být vyvolán vlivem působení statického nebo kapilárního tlaku. Částečným kriteriem propustnosti dřeva může být jeho pórovitost. Samotný objem pórů však o propustnosti dřeva zcela nerozhoduje. Důležité je vzájemné propojení jednotlivých pórů do vodivého kapilárního systému. U dřeva se toto propojení uskutečňuje pomocí perforovaných přehrádek cév, ztenčenin v buněčných stěnách nebo pomocí křížových polí dřevových paprsků. Z pohledu propustnosti vody musí být poloměr vodivých cest větší jak  $10^{-7}$  m. Všeobecně platí, že dřevo listnáčů je pro kapaliny propustnější než dřevo jehličnanů. Rozdíl je způsoben převážně přítomností cév. Největší propustnost je ve směru podélném. Ve směru radiálním (podobně jako u difuze) je dřevo díky dřevovým paprskům propustnější než ve směru tangenciálním. Propustnost dřeva ovlivňují ztenčeniny buněčné stěny. Aspirace ztenčenin u smrkového dřeva způsobuje jeho malou propustnost. U borovice je potom znatelný vliv bradavičnaté vrstvy na povrchu buněčné stěny, jejíž přítomnost může propustnost významně zvýšit. Propustnost dřeva podstatně ovlivňuje také předcházející sušení dřeva. Pohyb vody volné při sušení způsobuje vznik značných kapilárních sil, které mohou způsobit vychýlení uzavírací blanky nebo marga a torusu ve dvojtečkách vodivých elementů dřeva a uzavření vodivých cest (aspirace ztenčenin). Letní tracheidy jehličnatého dřeva zůstávají na rozdíl od jarních tracheid po sušení relativně průchozí a propustné (Siau 1984, Trebula 1989, Babiak 1990, Horáček 2008).

Nejlepší propustnosti listnatých dřev je dosahováno při vlhkosti na mezi hygroskopicity. Vlhkost dřeva pod mezí hygroskopicity má význam u jehličnatých dřev, kdy dochází k sesychání mikrofibrilárních závěsů marga v dvůrkatých ztenčeninách, což se projevuje zlepšenou propustností dřeva s nízkou vlhkostí. Při impregnaci je pro tekutiny špatně propustné smrkové dřevo, dřevo jádrové, dřevo nepravého jádra a dřevo ucpané thylami „zathylované“. Dobře propustná jsou zpravidla dřeva roztroušeně pórovitých dřevin a bělové dřevo z listnatých i jehličnatých dřevin.

Pro zvýšení příjmu impregnačních látek dřevem se používají různé metody. Kromě navrtávání a změny tlaku vnějšího prostředí bylo například popsáno zvýšení propustnosti pomocí mikrovlnného záření (Torgovnikov 2000) nebo zvýšení propustnosti dřeva pomocí impregnace kapalným amoniakem (Rosca 2005), případně bylo využito působení enzymů hub nebo bakterií (Pánek 2008).

#### **2.7.5 Tepelné vlastnosti dřeva**

Tepelné vlastnosti dřeva jsou důležité z hlediska tepelně izolačních schopností stavebních materiálů na bázi dřeva, při ohřevu dřeva u sušení a při hydrotermické úpravě pařením nebo vařením. V důsledku působení tepla může dojít ke změně rozměrů dřeva. Výhodou dřeva jako materiálu je, že teplotní roztažnost je v porovnání s jinými materiály při běžných teplotách zanedbatelná. Ale i zde platí určitá rozdílnost v jednotlivých anatomických směrech – tangenciálním, radiálním a podélném (15 / 10 / 1) (Siau 1984). Pouze extrémně vysoké teploty spojené s různými technologickými procesy mohou znamenat větší rozměrové změny. Dřevo je schopno akumulovat určité množství tepla. Množství tepla potřebné k ohřátí jednotkové hmotnosti dřeva o 1 °K je nazýváno měrné teplo dřeva. Protože hmotnost

absolutně suchého tělesa vyjadřuje hmotnost dřevní substance, nezávisí měrné teplo na druhu ani hustotě dřeva. Závisí ale na teplotě a vlhkosti dřeva. Měrné teplo se potom určuje z měrného tepla suchého dřeva a měrného tepla vody. Čím je vlhkost dřeva vyšší, tím větší množství energie je na ohřev potřeba. Přenos tepla se ve dřevě může uskutečňovat prouděním, vedením a sáláním (konvekce, kondukce a radiace). Je-li po celou dobu vedení tepla v tělese konstantní spád teploty mezi dvěma místy, hovoří se o stacionární difúzi tepla (stacionárním ději). Není-li teplotní spád konstantní, jedná se o difúzi nestacionární - přenos tepla je nestacionární. Vedení tepla ve dřevě ovlivňuje především anatomická stavba, hustota a vlhkost dřeva. Přenos tepla ve směru podél dřevních vláken je asi 1,5 až 2,5 krát větší než ve směru příčném. Stacionární difúzi tepla popisuje I. Fourierův zákon, který je obdobou I. Fickova zákona. Pro vysušené dřevo je typická velmi dlouhá doba potřebná na změnu teploty v objemu dřeva. To vysvětluje velmi dobré tepelně izolační vlastnosti dřeva jako stavebního materiálu (Skaar 1988, Trebula 1989, Horáček 2008).

Pokud se provádí různé formy úpravy dřeva, mohou být specificky ovlivněny tepelně izolační vlastnosti výsledného produktu. Impregnujeme-li dřevo syntetickou pryskyřicí do úplného nasycení buněk, může sice dojít k očekávanému zlepšení některých mechanických vlastností, mohou se ale zhoršit tepelně izolační vlastnosti. Naopak pokud je dřevo upraveno působením mikrovlnného záření, tepelně izolační vlastnosti selepší, ale může dojít k významnému zhoršení pevnosti modifikovaného dřeva (Torgovnikov 2000).

### **2.7.6 Elektrické vlastnosti dřeva**

Z pohledu elektrických vlastností je u dřeva sledována elektrická vodivost a permitivita. Vodivost elektrického proudu dřevem závisí na vlhkosti, teplotě, druhu dřeva. Suché dřevo je dielektrikum. Elektrická vodivost (schopnost polarizace) roste s obsahem vlhkosti. Elektrický odpor dřeva klesá s rostoucí vlhkostí a s rostoucí teplotou. Elektrický odpor ve směru kolmo na dřevní vlákna je až 4krát větší než ve směru vláken. Dřevo s vlhkostí do 8 % je považováno za izolant. Na principu zjišťování elektrického odporu je například založen i princip přístrojů na odhad vlhkosti dřeva. Zjištěný elektrický odpor je potom převeden na odpovídající vlhkost dřeva. Tento typ vlhkoměrů je vhodné používat při měření vlhkosti dřeva do meze hygroskopicity. Nad touto hranicí je výsledek měření vlhkosti dřeva nepřesný. Při použití elektrických odporových vlhkoměrů by měla být současně provedena korekce podle teploty a druhu měřeného materiálu. Permitivita souvisí se schopností materiálu přenášet elektrické pole, nebo-li na schopností polarizace materiálu. Dřevo je považováno za dielektrikum, tedy izolant, který je schopný částečné polarizace. S nárůstem obsahu vody ve struktuře dřeva roste schopnost polarizace dřeva pomocí elektromagnetického vlnění (Siau 1984, Makovíny 1987, Skaar 1988, Trebula 1989, Požgaj 1997, Torgovnikov 2000, Horáček 2008).

Například interakce mikrovln a dřeva je v praxi využito pro určování vlhkosti dřeva, při dielektrickém ohřevu a sušení dřeva, při vytvrzování impregnačních látek nebo při úpravě propustnosti dřeva. Při tzv. nepřímém měření vlhkosti je charakteristickou veličinou absorpce mikrovln. Její velikost je závislá na obsahu vlhkosti dřeva. Mikrovlnná energie se ve dřevě spotřebuje především k polarizaci molekul vody. Ta je v důsledku tření doprovázena vznikem tepla. Absolutně suché dřevo je považováno za dielektrikum. S obsahem vlhkosti a dalších látek schopných polarizace, jeho elektrická vodivost roste.

### **2.7.7 Optické vlastnosti dřeva**

K optickým vlastnostem dřeva patří barva a interakce dřeva s různými druhy záření. Optické vlastnosti dřeva jsou v zásadní míře ovlivňovány kvalitou povrchu, která je dána především anatomickou strukturou dřeva a způsobem mechanického opracování. Důležitým faktorem pro posuzování povrchu dřeva je drsnost, která může celkové hodnocení významně ovlivnit.

Pro naše dřeva platí, že pouhým okem viditelná textura dřeva je dána především charakteristickou stavbou letokruhů, velikostí a množstvím pórů (Požgaj 1997).

Pro různá dřeva je charakteristická především barva. Barva obecně je určitým zrakovým vjemem, který je závislý na spektru odrážených paprsků. To platí i při pohledu na dřevo. Barva dřeva je dána obsahem hlavních stavebních složek dřeva a především množstvím doprovodných látek. Barvu dřeva lze hodnotit pomocí subjektivních pocitů i objektivních metod. Optická metoda, která se problematice hodnocení barvy povrchu látek věnuje se nazývá kolorimetrie. Pro objektivní hodnocení barvy dřeva se v současnosti používá soustava tří barevných světél jejichž kombinací lze vyvolat vjem jakékoliv barvy. K nezávislému objektivnímu stanovování barvy se používají kolorimetry – přístroje na určování trichromatických souřadnic barevného světla. Při objektivním hodnocení barvy je nutno charakterizovat podmínky za nichž se měření provádí. Na rozdíl od tuzemských dřev, které nevykazují příliš širokou škálu barev, vynikají dovážená tropická dřeva velkým množstvím odstínů a barev (Riedl 2002, Baar 2010).

Aby se rozšířila škála odstínů a barev našich dřev, provádí se jednoduché úpravy na povrchu dřeva jako je například lazurování, opalování, pískování, kartáčování nebo složitější operace, kdy se dřevo impregnuje, případně reliéfuje nebo lisuje.

## **2.8 Vybrané mechanické vlastnosti dřeva**

Mezi sledované mechanické vlastnosti dřeva se řadí díky mechanickému namáhání zejména pružnost a pevnost (Kolman 1951, Matovič 1993, Horáček 2008). Právě pro tyto vlastnosti je dřevo tolik ceněno jako materiál k praktickému použití. Uplatní se všude tam, kde je výhodou poměrně vysoká pevnost vůči jeho nízké hmotnosti. Mechanické vlastnosti jsou současně velmi důležité i pro technologické procesy zpracování dřeva jako je řezání, loupání, krájení, lisování a ohýbání. Jako základní mechanické vlastnosti dřeva bývají označovány pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost. Některé vlastnosti jsou ze základních mechanických vlastností dřeva odvozené. Sem řadíme například tvrdost, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení nebo odolnost proti únavovému lomu. Kromě již uvedených mechanických vlastností se v této souvislosti zmiňují pro zpracovatelskou praxi důležité tzv. technologické vlastnosti dřeva. Skupinu těchto vlastností představuje např. obrobitelnost, opotřebitelnost (obrusnost), schopnost tvarování (obývatelnost), schopnost lisování nebo schopnost vytváření spojů lepením.

Mechanické vlastnosti dřeva, obdobně jako vlastnosti fyzikální, jsou zásadně ovlivněny nehomogenitou, danou specifickou anatomickou stavbou. Rozdílnost vlastností dřeva v jednotlivých směrech je označována jako anizotropie. Zde hrají velkou roli chemické kovalentní a vodíkové vazby, spojující řetězce celulózy. Tvar a uspořádání trachejí a tracheid a směr uspořádání mikrofibril ve střední vrstvě sekundárních stěn buněčné stěny je příčinou anizotropie vlastností dřeva především ve směru rovnoběžném a kolmém vzhledem k dřevním vláknům (Kollman 1959). Při zatížení dřeva v podélném směru jsou namáhány pevné kovalentní vazby. Namáhání dřeva ve směru kolmém ovlivňují méně pevné vodíkové vazby. Proto síly působící kolmo na dřevní vlákna způsobují větší deformace než síly působící rovnoběžně s dřevními vlákny. Rozdíly v pevnosti dřeva v radiálním a tangenciálním směru ovlivňuje částečně přítomnost dřeňových paprsků a různá objemová hmotnost jarního a letního dřeva v rámci letokruhů (Matovič 1993, Požgaj 1997, Horáček 2008).

Mechanické namáhání dřeva představuje stav, při němž působí na dřevo vnější mechanické síly, které ho mohou do jisté míry deformovat. Výsledkem interakce mezi mechanickou silou a dřevem je potom dočasná nebo trvalá změna tvaru a struktury dřeva. Mechanické namáhání působí na povrchu těles. Naopak vlhkostní namáhání způsobené rozdíly ve vlhkosti nebo elektromagnetické vlnění může působit v celém objemu dřeva. Při modifikaci vlastností dřeva působí zpravidla více forem namáhání současně nebo se střídají. Odezva dřeva na mechanické

namáhání závisí jak na chemických vazbách (vodíkové, kovalentní) mezi hlavními stavebními složkami dřeva (celulóza, hemicelulózy, lignin), tak na tvaru a rozměrech zatěžovaného tělesa. A právě procesy modifikace dřeva mohou způsobit výrazné změny v oblasti mechanických vlastností. Jakýkoliv nový produkt nebo technologie, který je v oblasti modifikace vyvinut, je proto důkladně zkoumán i po stránce mechanických vlastností. Například poměrně dynamicky se rozvíjející procesy tepelné modifikace mohou negativně ovlivnit pružnost a pevnost dřeva (TWA 2003).

### **2.8.1 Pružnost dřeva**

Pružnost dřeva je schopnost dosáhnout po uvolnění zatížení původních rozměrů. Z hlediska makroskopické stavby se jedná o vratný děj. Z pohledu dřevních polymerů se už určité změny vyskytnout mohou. Pružnost dřeva lze popsat pomocí modulů pružnosti, Poissonovými čísly, mezi úměrnosti, případně energií pružné deformace.

Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Rozlišují se moduly pružnosti pro normálová zatížení (tah, tlak, ohyb) a moduly pro tangenciální zatížení (krut, smyk). Při hodnocení pružnosti dřeva záleží na poměru mezi posunutím a vzniklým napětím. Při pružné deformaci je napětí přímo úměrné relativnímu prodloužení. Vztah mezi poměrným posunutím a příslušným napětím je do meze úměrnosti lineární. Jednotlivá dřeva mají charakteristický modul pružnosti. Změnu objemu dřeva způsobenou vlivem vnějšího mechanického zatížení charakterizují Poissonova čísla. Deformace ve směru působící síly vyvolává současně deformaci rozměru i ve směru kolmém. Poissonovo číslo potom vyjadřuje poměr příčné deformace dřeva k deformaci podélné. Pokud napětí v zatěžovaném dřevě překročí určitou hranici (mez úměrnosti), začne být závislost mezi poměrným posunutím a příslušným napětím nelineární. Mez úměrnosti je závislá na rychlosti zatěžování dřeva. Až do meze úměrnosti se dřevo při jednoosém zatížení chová jako lineárně pružný materiál. Pružnou deformaci materiálu vlivem působení síly (za předpokladu malých sil a malých deformací, které po odlehčení zmizí) popisuje Hookeův zákon. Empirická křivka charakterizující vztah mezi napětím a deformací je označována jako pracovní diagram. Diagram napětí a deformace dřeva můžeme rozdělit na dvě části. Na část lineární do meze úměrnosti a část nelineární nad mezí úměrnosti (po mez pevnosti). Nad mezí úměrnosti už nejsou plastické deformace přímo úměrné napětí a po ukončení působení vnější síly nezanikají a materiál zůstává zdeformován. V případě uplatnění Hookeova zákona na dřeva je nutné dodržet následující podmínky. Musí se jednat jen o deformace do 1 % původního rozměru (malé deformace), musí být konstantní teplota materiálu, rovnoměrně rozložená hustota a mezi jednotlivými složkami napětí nesmí existovat žádná spojitost. Platnost Hookeova zákona se aplikuje na nejjednodušší případy. Zkouší se tak například tlaková pevnost dřeva rovnoběžně s dřevními vlákny. Jednotlivé osy symetrie (podélná, radiální, tangenciální) se musí shodovat s geometrickými osami. V těchto směrech se potom sledují deformace při zatížení pod mezí úměrnosti. Mezi napětím a deformacemi zde existuje lineární závislost (Kollmann 1951, Požgaj 1997, FPL 1999, Horáček 2008).

### **2.8.2 Pevnost dřeva**

Pevnost dřeva charakterizuje odolnost dřeva proti trvalému porušení jeho struktury. Informace o pevnosti dřeva se zjišťují prostřednictvím experimentálních zkoušek, kde je sledováno skutečné napětí v okamžiku porušení tělesa (skutečná pevnost dřeva). Při porušení dřevní struktury dochází k oddělení jednotlivých stavebních částí dřeva. Odolnost dřeva vůči namáhání v tlaku se nazývá tlaková pevnost dřeva. Dělí se na tlakovou pevnost ve směru dřevních vláken (rovnoběžně s dřevními vlákny) a tlakovou pevnost kolmo na dřevní vlákna. Tlaková pevnost dřeva ve směru vláken je z praktického hlediska velmi důležitou vlastností. Působením tlaku na těleso podél vláken dojde k deformaci, která se projevuje zkrácením



délky zkušební tělesa. Charakter deformace závisí na druhu, jakosti a stavbě dřeva. Důležitými činiteli jsou dále hustota a vlhkost dřeva. U dřeva vlhkého s nízkou hustotou a malou pevností dochází k otlacení vláken na čelních plochách a k vybočení stěn zatěžovaných těles. V zóně porušení dochází ke změnám mikroskopické stavby jednotlivých elementů a porušení díky oddělování jednotlivých částí (Kollmann 1951, Horáček 2008).

#### 2.8.2.1 Tlaková pevnost dřeva

Pro využití dřeva je velmi významná jeho vysoká pevnost dřeva v tlaku podél vláken. Tato pevnost je v praxi oceňována především u různých vzpěr, částí nosníků, konstrukcí apod. Závisí především na pevnosti jednotlivých stavebních elementů dřeva při zatížení v tomto směru, ale i na pevnosti jejich vzájemného spojení. V případě tlakové pevnosti kolmo na dřevní vlákna dochází k postupné deformaci. Nedochozí k výraznému rozdělení, ale naopak ke zhušťování dřevní struktury v celém objemu. Pevnost dřeva v tlaku napříč vláken, je potom označována jako konvenční. V tomto případě nelze totiž prakticky dosáhnout jasně konečného porušení zkušební tělesa. Průměrná mez pevnosti v tlaku podél vláken je okolo 45 MPa.

Při působení tlaku ve směru kolmém na dřevní vlákna jsou s ohledem na makroskopickou stavbu letokruhu možné dva průběhy závislosti napětí. U jehličnatých a většiny listnatých kruhovitě pórovitých dřev probíhá deformace při tlaku kolmo na vlákna v tangenciálním směru dvofázově, při čemž se elementy jarního i letního dřeva se stlačují v obou fázích současně. Při tlaku napříč vláken v radiálním směru je pro všechna naše dřeva s výjimkou dubu charakteristická třífázová deformace. V první fázi deformace dochází ke stlačování jarního dřeva v jednotlivých letokruzích. Na konci této fáze je dosaženo meze úměrnosti. V další fázi začíná stlačování anatomických elementů. Proces probíhá vlivem působení stejného nebo mírně vzrůstajícího napětí a postupně se rozvíjejí plastické deformace. Druhá fáze končí postupnou deformací obou vrstev v rámci letokruhu. Poslední fáze je charakterizována zvýšením zatížení a dalším stlačováním dřeva. Při působení tlaku kolmo na dřevní vlákna nedochází ve většině případů k celkovému porušení zkušební tělesa (Kollmann 1951, Požgaj 1997, Horáček 2008).

#### 2.8.2.2 Tahová pevnost dřeva

Tahová pevnost se u dřeva rozděluje na pevnost v tahu ve směru dřevních vláken a pevnost v tahu napříč vláken ve směru radiálním nebo ve směru tangenciálním. Pevnost dřeva v tahu ve směru vláken (rovnoběžně s dřevními vlákny) je největší. Průměrná hodnota tahové pevnosti ve směru vláken pro naše dřeva se udává 120 MPa. Pevnost dřeva v tahu podél vláken je dána především vláknitým tvarem buněk a strukturou buněčných stěn. Z makroskopického hlediska je pevnost dřeva v tahu snížena přítomností dřeňových paprsků. Dřevo zatěžované v tahu napříč vláken vykazuje jednu z nejmenších pevností vůbec (Kollmann 1951, Požgaj 1997, Horáček 2008).

#### 2.8.2.3 Ohybová pevnost dřeva

Pevnost dřeva v ohybu je v praxi využívána zejména v oblasti nosníků a trámů. Hlavní uplatnění má pevnost dřeva zatíženého kolmo na dřevní vlákna v radiálním nebo tangenciálním směru. Ostatní případy zatížení jsou méně významné. Při zatěžování dřevěného tělesa ve statickém ohybu vznikají na vnitřní straně ohybu (ze strany působící síly) tlaková napětí a na vnější straně napětí tahová. Díky tomu můžeme na čele hranolku na tahové vnější straně pozorovat zmenšení šířky tělesa a na tlakové straně naopak zvětšení šířky. Místo na průřezu, kde se rozměry nemění je označováno jako neutrální vrstva. Pevnost dřeva v ohybu závisí na poměru vzdálenosti podpěr a tloušťky zatěžovaného tělesa (štíhlost). U malých

průřezů se obvykle dosahuje větší ohybové pevnosti než u průřezů velkých. Mez pevnosti v ohybu u našich dřevin dosahuje až 90 MPa (Matovič 1993, Horáček 2008).

### **2.8.3 Tvrdost dřeva**

Do skupiny vlastností, které nemůžeme jednoznačně zařadit z pohledu působící síly patří zejména tvrdost a obývatelnost dřeva.

Tvrdost dřeva je schopnost dřeva klást odpor proti vnikání cizího tělesa do jeho struktury. Tvrdost má význam při obrábění nebo dělení dřeva, případně při využití dřeva na podlahy, schodnice, či dřevěné mostovky. Při zjišťování tvrdosti dřeva můžeme postupovat dvěma způsoby. Oba jsou založeny na vlačování kovové kuličky do dřeva. Při jednom (zkouška podle Brinella) je kulička vlačována definovanou silou a stanovuje se plocha která se otlakem vytvořila. Druhý způsob zjišťování tvrdosti spočívá v tom, že se zaznamenává výsledná síla při níž je dosaženo zatlačení kuličky do určité hloubky (zkouška podle Janky). S ohledem na značnou různorodost struktury dřeva je vždy vhodné uskutečnit na jednom zkušebním tělísku v různých místech více měření. Velmi důležité také je, ve kterém anatomickém směru je kulička do dřeva vlačována (Horáček 2008).

### **2.8.4 Ohývatelnost dřeva**

Ohývatelnost je technologická vlastnost dřeva, při níž je těleso o určité technologické vlhkosti a teplotě tvarováno (deformováno) určitým směrem. V případě zvýšení vlhkosti dřeva směrem k mezi hygroskopicity nebo pomocí úpravy teploty a vlhkosti hranolku pařením se neutrální vrstva, v důsledku menší tlakové pevnosti dřeva posune směrem k vnější straně ohybu. Zvýšený obsah vody v oblasti polysacharidické složky a vyšší plasticita ligninu vlivem teplot nejčastěji okolo 100 °C způsobují přechodné snížení pevnosti dřeva. Obývatelnost je významně ovlivněna ortotropní strukturou a vadami dřeva. S dobrou obývatelností dřeva bývá spojován vyšší obsah pentosanů. Výjimku tvoří bukové dřevo. Jehličnatá dřeva s velkými rozdíly mezi vlastnostmi jarního a letního dřeva se ohýbají hůře než dřeva listnatá (Vaněk 1952, Trebula 1989, Požgaj 1997).

Jako kritický ohyb bývá označována míra obývatelnosti dřeva, která je dána poměrem mezi tloušťkou materiálu a poloměrem ohybu. S rostoucí vlhkostí a teplotou roste míra tvárnosti dřevěných dílců. Jistotu, že k porušení materiálu nedojde potom představuje dvojnásobný rádius ve jmenovateli (bezpečný ohyb). V praxi to znamená, že se zvětšením tloušťky dílce se bude rádius ohybu zmenšovat (Vaněk 1952, Trávník 2005).

## **2.9 Odolnost dřeva vůči biologické degradaci**

Odolnost vytěženého masivního dřeva vůči biologickým faktorům je závislá na anatomické stavbě a chemickém složení. Míra odolnosti vůči těmto vlivům je potom trvanlivost dřeva. Trvanlivost dřeva může také ovlivnit obsah vody a vzduchu ve dřevě. Méně závažným důsledkem působení biologických činitelů jsou barevné změny. Ke změně barvy dřeva může dojít při pomalém sušení řeziva nebo při nevhodném uskladnění výřezů (buk, bříza) v případě zapaření dřeva. K zapaření zpravidla dojde pokud je dlouhodoběji teplota v okolí dřeva 20 °C a vlhkost čerstvého dřeva klesne pod 50% hranici. Naopak dostane-li se vlhkost dřeva pod 20% hranici je riziko poškození dřeva výrazně nižší. K zapaření dochází zejména při příliš pomalém snižování obsahu vody v uvedeném rozmezí. V průběhu procesu pomalého odumírání dřevního parenchymu se potom může v letních cévách letokruhů tvořit nežádoucí povlak. V protoplazmě začínají oxidovat třísloviny a dřevo v okolí tmavne. U některých dřev je zapaření spojeno s tvorbou thyl. Pokud uvedené podmínky trvají i nadále pokračuje zapaření zpravidla následnou činností plísní a hub na skladovaném dřevě (Horský 1987, FPL 1999).

Houby napadající vytěžené dřevo se označují jako saprofytické. Mezi tyto houby patří houby dřevozbarvující a houby dřevokazné. Barevné změny způsobují také plísně. Na povrchu napadeného dřeva se v důsledku jejich činnosti tvoří jednotlivé skvrny nebo větší povlaky zpravidla zelené, zelenomodré, šedé nebo hnědé barvy. Působení samotných plísní je pouze povrchové a do hloubky dřeva se neprojevuje. Také napadení dřevozbarvujícími houbami se projevuje místními barevnými skvrnami (zamodráním, zešednutím, zčervenáním, zežloutnutím, zhnědnutím). Mechanické vlastnosti dřeva se významně nemění. Napadení však postihuje strukturu dřeva do větší hloubky. Napadána je zpravidla bělá nebo vyvrálé dřevo. V důsledku působení dřevozbarvujících hub se může významně snížit propustnost napadeného dřeva. Výrazně horší následky má působení hub rozkládajících dřevo - hub dřevokazných. Dřevokazné houby zhoršují mechanické a mění fyzikální vlastnosti dřeva. Výsledkem jejich činnosti při optimální teplotě 20 až 30 °C a vlhkosti dřeva pod 50 % je bílá nebo červenohnědá hniloba. Hranice 20% vlhkosti dřeva je důležitá. Pod touto hranicí vlhkosti již dřevo nebývá zpravidla dřevokaznými houbami napadeno. V první fázi rozkladu dřeva je dřevo vystaveno působení enzymů, které se uvolňují z výtrusů nebo mycelia (podhoubí), které se rozšířilo na povrchu napadeného dřeva. Působením celuláz, xyláz, manáz a lakáz dochází k rozkladu dřevních polysacharidů (celulóza, hemicelulózy), případně k rozkladu fenylopropanových jednotek ligninu. Depolymerizované uhlovodíky využívá dřevokazná houba pro svůj metabolismus. V důsledku reakcí enzymů se dřevem dochází k uvolňování vody a oxidu uhličitého. Hlavní stavební složkou buněčné stěny hub je chitin. Je to polysacharid s obsahem dusíku velmi podobným celulóze, minerální látka a voda. Existuje rozdělení na houby bílého tlení a houby hnědého tlení. Toto rozdělení je založeno na tom, že při působení různých enzymů na dřevo vznikají buď fulvokyseliny nebo huminové kyseliny. Huminové látky potom představují specifickou skupinu vysokomolekulárních a nízkomolekulárních látek typické tmavé barvy (Horský 1987, Reinprecht 1992).

Jedna skupina dřevokazných hub (celulózovorní) rozkládá primárně polysacharidickou složku dřeva. Celulóza tvořící hlavní složku buněčných stěn je bezbarvá. Obsah ligninu ve dřevě není činností celulózovorní houby zásadně ovlivněn. Barva dřeva napadeného celulózovorní dřevokaznou houbou se díky zvyšujícímu se poměrnému zastoupení ligninu postupně mění na rezavě červenou až hnědou nebo červenohnědou. Významně se zmenšuje objem a snižuje se hmotnost dřeva. Praskliny, vzniklé zmenšením objemu vytvářejí na povrchu charakteristickou kostkovitou strukturu. Napadené dřevo je vlivem snížení obsahu celulózy křehké a lámavé (destrukční hniloba). Druhá skupina dřevokazných hub (ligninovorní) rozkládá kromě celulózy a hemicelulóz také lignin. Barva dřeva napadeného ligninovorní dřevokaznou houbou se vlivem napadení mění na světle hnědou až žlutobílou. Takto poškozené dřevo z počátku neubývá na objemu a netvoří na povrchu kostkovité útvary. Dřevo se rozpadá korozivně a je tedy měkké a drobné v celém objemu (Bajer 1983, Horský 1987, Reinprecht 1992, Dejmal 1995).

Také některé bakterie a plísně uvolňují enzymy, které jsou schopné rozkladu (hydrolýzy) dřeva. Tyto enzymy mohou způsobit barevné změny i rozklad jednotlivých složek dřeva. U nativního dřeva se jejich projev ve formě barevných skvrn a pruhů (dub) vyskytuje spíše výjimečně. Je však předmětem zájmu výzkumníků, kteří se v tomto případě zaměřují na řízené využití působení některých enzymů např. pro zvýšení propustnosti dřeva (Pánek 2008).

## **2.10 Odolnost dřeva vůči tepelné degradaci**

Jednotlivé stavební složky dřeva mají různou odolnost vůči působení teplot nad 100 °C. Teploty do 150 °C podporují odpařování vody ze dřeva. Vůči tepelnému rozkladu jsou nejméně odolné amorfnní hemicelulózy. Jejich chemický rozklad nastává už při 170 °C. K maximální depolymerizaci hemicelulóz dochází při teplotách 250 až 300 °C. Celulóza je vůči působení tepla odolnější. Amorfnní část je však méně odolná než část krystalická. Při

teplotách do 250 °C je celulóza poměrně stabilní. V tomto teplotním intervalu probíhají dehydratační reakce a radikálová oxidace doprovázené snižováním polymeračního stupně. Chemické reakce jsou provázeny výraznou změnou (tmavnutím) odstínu barvy dřeva. Změna barvy je závislá na teplotě a čase. K podstatnému tepelnému rozkladu celulózy dochází až při teplotách od 250 do 350 °C. Rozklad celulózy se projevuje narušováním vazeb v základním řetězci. Koncový článek celulózy se přeměňuje na levoglukozan, který se následně podílí na tvorbě nových produktů rozkladu. Změny v oblasti celulózy znamenají výrazné ovlivnění mechanických vlastností dřeva. Lignin je vůči působení vysokých teplot nejodolnější. I když při teplotách 100 až 200 °C dochází k jeho plastifikaci, chemická skladba zůstává. K aktivnímu rozpadu ligninu dochází až při teplotách od 300 do 400 °C. Rychlost tvorby nových produktů je pomalejší než u celulózy. Naopak se zvyšováním teploty se rychlost rozpadu zpomaluje a dochází ke kumulaci aromatických struktur. Tepelné zatěžování zhoršuje mechanickou pevnost dřeva v tlaku, tahu, ohybu i smyku. Kromě teploty hraje při změně vlastností dřeva důležitou roli čas. Půlhodinové působení teploty do 200 °C v inertní atmosféře, ještě vlastnosti a strukturu dřeva příliš významně neovlivní. Avšak samotné dosažení teploty 250 °C již může mechanické vlastnosti dřeva ovlivnit zásadně. Při studiu hořlavosti dřeva porovnáváme změny v chemickém složení, anatomické stavbě a fyzikálních vlastnostech, ke kterým došlo vlivem termooxidační reakce. Hoření dřeva představuje termický rozklad vazeb základních chemických komponent dřeva a změnu jeho chemického složení za vzniku nových produktů. Hořlavost dřeva významně ovlivňuje jeho objemová hmotnost. S rostoucí objemovou hmotností dřeva jeho hořlavost klesá. Na výsledek působení tepla na dřevo má vliv i obsah kyslíku v okolním prostředí. V případě nedostatku kyslíku v prostředí nebo v prostředí inertní atmosféry dochází při vysokých teplotách k suché destilaci (pyrolýze) dřeva na jednotlivé frakce. Naopak v případě vysoké teploty a dostatku kyslíku produkty vznikající tepelným rozkladem dřeva shoří (Kollmann 1951, Oswald 1984, Bučko 1997). Působení vysokých teplot okolo hranice 200 °C v inertní atmosféře je podstatou tepelné modifikace dřeva za účelem zvýšení rozměrové stability a biologické odolnosti (Teischinger 2002, TWA 2003, Homan 2004, Hill 2006).

### 3 Metody modifikace vlastností dřeva

Jakákoliv požadovaná přechodná nebo trvalá změna vlastností masivního dřeva vyžaduje určitý postup, jak této změny dosáhnout. V dalším textu jsou uvedeny vybrané postupy a metody modifikace vlastností dřeva včetně sušení řeziva. Některé jsou citovány různými autory již dlouhou řadu let, ale objevují se i metody poměrně nové (Kollmann 1951, Siau 1984, Skaar 1988, Keey 2000, Teischinger 2002, Hill 2006). Některé postupy z počátku průmyslové revoluce využívaly ještě poměrně šetrné postupy známé z dávné minulosti, ale v důsledku intenzifikace výroby byly změněny nebo nahrazeny. Některé průmyslové metody používané během 20. století se nakonec ukázaly jako značně nešetrné vůči životnímu prostředí. Koncem 20. století tak nastala potřeba zrušit či upravit postupy zatěžující přírodu nebo přijít s procesy novými. V dalším textu jsou proto uvedeny postupy, které se v souvislosti s modifikací vlastností dřeva v současné odborné literatuře vyskytují nejčastěji.

V roce 2003 se v belgickém Gentu z iniciativy předních evropských vědců konala první evropská konference o modifikaci dřeva (European Conference on Wood Modification – ECWM) (Van Acker 2003). Její účastníci si vytkli jako hlavní cíle stanovit koncepci a základní směry rozvoje pro oblast modifikace dřeva ze současného pohledu. Účastníci konstatovali, že oblasti modifikace vlastností dřeva nebyla, ani ve vyspělých průmyslových zemích, dosud věnována náležitá pozornost. Bylo poukázáno na to, že nové materiály na bázi masivního dřeva musejí mít vysokou kvalitu a zdravotní nezávadnost, a že formou nových technologií výroby musí dojít k významnému omezení zátěže životního prostředí. Na závěr bylo dohodnuto, že hlavními tématy modifikace dřeva v budoucnosti budou především tepelné ošetření dřeva, chemická modifikace dřeva a hydrofobizace dřeva. Od roku 2003 se tato mezinárodní konference uskutečňuje zpravidla každý druhý rok. V Evropě nyní v oblasti modifikace dřeva pracují různé skupiny vědců, výzkumníků a odborníků z praxe v rámci programu evropské spolupráce ve vědeckém a technickém výzkumu COST (The European Cooperation in Scientific and Technical Research). Některé projekty jsou nebo byly přímo zaměřeny na spolupráci ve výzkumu v oblasti sušení a jakosti vysušeného řeziva, na posuzování a hodnocení kvality dřeva a produktů ze dřeva a na doporučené postupy pro sušení dřeva (Welling 1995). Vybraní evropští odborníci se zabývali technologiemi na zvýšení odolnosti dřeva proti biotickému poškození a soustředili se na stanovení nové strategie v oblasti modifikace dřeva. Pozornost byla také soustředěna na optimální a zároveň ekologickou ochranu dřeva. Ve výzkumu a praxi se díky tomu v současnosti používají v jednotlivých členských zemích Evropské unie společné postupy a metody pro hodnocení účinnosti různých opatření ve jmenovaných oblastech. Například pro hodnocení zbytkového napětí u vysušeného řeziva se u nás od roku 2003 začala používat metodika, nahrazující tradiční vidličkovou zkoušku (ENV 14464). Příjem impregnační látky dřevem nebo úbytek hmotnosti dřeva v důsledku působení dřevokazných hub se hodnotí pomocí hmotnostního přírůstku (úbytku) – WPG (Weight Percentage Gain). Tento úbytek je vyjádřen v procentech z podílu rozdílu aktuální hmotnosti zkušební vzorku a jeho původní hmotnosti k hmotnosti původní. Účinnost ošetření dřeva proti bobtnání je dána účinností proti rozměrovým změnám – ASE (Anti Swellig Efficiency) a je vyjádřena v procentech podílem rozdílu bobtnání neošetřeného dřeva a dřeva ošetřeného k bobtnání neošetřeného dřeva. Existuje celá řada dalších společných hodnotících kritérií a norem. Jedním z velmi důležitých měřítek je hodnocení životního cyklu nově vyvinutých materiálů – LCA (Life Cycle Assessment), jako jedné z hlavních cest vedoucích k trvale udržitelnému rozvoji naší civilizace. Tato metoda posuzování environmentálních aspektů výrobku ve všech stádiích jeho „života“ je však zejména z hlediska interpretace výsledků velmi náročná (ČSN EN ISO 14040, Van Acker 2003).

### 3.1 Sušení řeziva

Dřevo rostoucího stromu nebo dřevo dlouhodobě máčené či postřikované obsahuje značné množství vody volné. Dřevo v tomto stavu je poměrně odolné proti napadení dřevokaznými houbami, pro běžné potřeby je však, až na výjimky, prakticky nepoužitelné. Proto je žádoucí upravit vlhkost dřeva tak, aby to pokud možno korespondovalo s podmínkami v nichž bude dlouhodobě používáno (vlhkost a teplota vzduchu), což je důležité především pro zachování jeho rozměrové stability.

Proces záměrného cíleného snižování vlhkosti dřeva se potom označuje jako sušení. Sušení dřeva je snižování vlhkosti dřeva zpravidla působením tepla. Při tomto procesu mají zásadní význam druh dřeva, rozměry, počáteční a konečná (požadovaná) vlhkost. Dřeva s vyšší objemovou hmotností (dub, habr) se suší pomaleji, podobně jako řezivo větší tloušťky. Rozdíly v rychlosti sušení dřeva mohou být dány i odlišnou anatomickou stavbou, chemickým složením nebo vadami, např. ucpáním cév thylami. Zejména u dřev, která mají vodivé cesty ucpány thylami (dub) je nutno zejména na počátku procesu sušení prohřátého dřeva s vysokou počáteční vlhkostí zabránit rychlému snížení obsahu vody z důvodu možného vzniku kolapsu. V dalším průběhu sušení, zejména po dosažení meze hygroskopicity je potřeba eliminovat vznik čelních, povrchových i vnitřních trhlin. Je všeobecně známé, že se zvyšováním vlhkosti dřeva do meze hygroskopicity se snižuje jeho pevnost, a že se změnou vlhkosti pod mezi hygroskopicity dřevo mění svoje rozměry (sesychá nebo bobtná). Dřevo jako hygroskopický materiál má tendenci přijímat vlhkost z okolního prostředí nebo ji do prostředí odevzdávat. Při sušení se teplo spotřebovává, naopak při příjmu vlhkosti se sorpční teplo uvolňuje (Kollmann 1951, Krečetov 1954, Sergovskij 1977, Trebula 1989).

Způsob sušení (sušící způsob) je charakteristický podmínkami přenosu tepla na dřevo, pohybem sušícího prostředí v hrani a v uzavřeném prostoru a odstraňováním vodní páry ze sušícího prostoru. Výměna tepla může probíhat vedením (*kondukcí*), sáláním (*radiací*) nebo prouděním (*konvekci*). Sušené dřevo obklopuje určité prostředí - sušící prostředí. Zpravidla se jedná o plynné prostředí (vlhký vzduch, vodní pára, páry chemických látek), pomocí kterého je dřevu zpravidla dodáváno teplo a pomocí kterého se odvádí odpařená vlhkost z bezprostřední blízkosti dřeva. Sušící prostředí je ve většině případů charakterizováno parametry sušícího prostředí (teplota a relativní vlhkost, rychlostí proudění a tlak). Hlavní hnací silou pohybu vlhkosti je rozdíl (gradient) v obsahu vlhkosti v různých místech na průřezu dřeva. Pro sušení (pohyb vlhkosti dřevem) platí, že se vlhkost z míst o vyšší koncentraci pohybuje na místa s koncentrací nižší. Sušení probíhá zejména v povrchových vrstvách a vlhkost se následně postupně snižuje směrem ke středu materiálu. Kromě gradientu vlhkosti proces sušení významně ovlivňují gradienty teploty a tlaku a rozdílných koncentrací (Siau 1984, Skaar 1988, Dejmal 1995, Trebula 1996, Keey 2000).

Dřevěné výrobky by měly mít vlhkost odpovídající vlhkosti prostředí v němž budou používány nebo vyráběny. Dřevěné součástky používané k elektrickým přístrojům 5 %, vrtule, tkalcovské člunky, dýmky 6 %, hudební nástroje nebo nábytek do místností s ústředním topením, řezivo na laťovkové středy, tužky, obklady interiéru, vnitřní dveře 7 %, nábytek do ložnic, násady, vnitřní stavebně-truhlářské práce 8 %, vybavení lodí, modely, řemenice, dýhy loupané a krájené 9 %, podlahy do interiéru a nábytek do kuchyní, koupelen a chat 11 %, okna, překližky, podlahy do občas vytápěných objektů 12 %, vnější okna a dveře 13 %, lepené vazníky, venkovní palubky 15 %, stavební konstrukce 15 až 20 %, zahradní nábytek 16 %, dřevo pro použití ve volné přírodě, bedny, obaly, sudy 18 %, hranolky pro ohýbání do 20 %. Při vlastním tvarování by hranolky na výrobu ohýbaného nábytku měly mít optimální vlhkost (technologickou) vyšší (25 až 30 %). Také pro lepení, povrchovou úpravu nebo modifikaci je určitá vlhkost dřeva velmi významná a závisí na konkrétním procesu.

Rychlost sušení ovlivňují faktory vnitřní (druh dřeva, rozměry a počáteční vlhkost) a faktory vnější (podmínky v nichž je dřevo při sušení uloženo). Zpravidla se rozlišují tyto dva základní způsoby sušení:

- sušení přirozené,
- sušení umělé.

Podle tlaku okolního prostředí se dělí sušení zpravidla na sušení při normálním atmosférickém tlaku a na sušení při tlaku nižším než je atmosférický tlak (podtlak - vakuum). Podle vzniku napětí v průběhu procesu sušení lze rozlišovat sušení tvrdé a sušení měkké. Důvodem vzniku napětí je dáno nevroměrně rozloženou vlhkostí (velký sušící spád). Čím mírnější jsou podmínky sušení (nižší teplota, vyšší relativní vlhkost vzduchu - sušení měkké), tím menší jsou zbytková napětí (zkornatění) a tím vyšší je výsledná kvalita. Čím tvrdší jsou podmínky sušení (vyšší teplota, nižší relativní vlhkost vzduchu), tím větší je nebezpečí vzniku kolapsu, trhlin, deformací a zbytkových napětí (Krečetov 1954, Trebula 1989, ON 49 0651).

### **3.1.1 Přirozené sušení řeziva**

Pro přirozené sušení je typické uložení řeziva k sušení na otevřeném volném prostranství (skladu řeziva), volně přístupném okolnímu (venkovnímu) vzduchu. Sušicím prostředím je atmosférický vzduch (ČSN 49 0650). Tento způsob sušení závisí především na klimatických podmínkách, jimž je materiál v průběhu sušení (uložení na skladu) vystaven. Dřevo bývá uloženo v hraních proložených uniformními proklady. O délce sušení rozhoduje kromě počáteční vlhkosti druh dřeva, rozměry materiálu, tloušťka prokladů, šířka hraně, velikost mezer mezi boky řeziva a roční období, kdy je materiál na sklad uložen. Při ukládání řeziva v zimním období jsou mezery mezi boky řeziva zpravidla větší. Naopak při ukládání řeziva v teplejších a suchých podmínkách bývají mezery menší. Řezivo se doporučuje ukládat stranou bližší k pomyslnému středu původního výřezu nahoru (tzv. pravá strana desky). Je tak zajištěna vyšší stabilita desek a snadnější odtok vody, která by se mohla při dešti do hraně dostat. Konečná vlhkost dřeva může být poměrně variabilní. Jako konečná vlhkost dřeva bývá při přirozeném sušení řeziva v normách často uváděna vlhkost 20 (30) %. Zejména tenké jehličnaté řezivo se ale v letním období běžně vysuší i na vlhkost podstatně nižší. Přirozené sušení lze v ojedinělých případech urychlovat nuceným pohybem vzduchu pomocí mobilních ventilátorů (Peleška 1963, Trebula 1996, FPL 1999, ČSN 49 0650).

Přirozené sušení řeziva se zpravidla kombinuje (kombinované sušení) s některými způsoby umělého sušení (teplovzdušné, mikrovlnné, vysokoteplotní, případně tam, kde se provádí kontaktní ohřev. Potom může být vnímáno, jako předsoušení – přirozené předsoušení.

Rozsah využívání přirozeného sušení řeziva se zejména z ekonomických důvodů prozatím spíše snižuje. Přesto existují výrobní procesy, které se bez tohoto způsobu jen stěží obejdou. Jedná se například o bednářskou výrobu, případně výrobu ohýbaného nábytku, kdy je technologická vlhkost dřeva vyšší. U výroby dřevěných hudebních nástrojů přispívá přirozené předsoušení (v důsledku neustálého střídání klimatických podmínek skladu) k menší senzitivitě použitého dřeva na změnu vlhkosti v okolí hudebního nástroje (Vaněk 1952, Trebula 1996).

Aby po pořezu nedošlo k poškození řeziva s vysokou vlhkostí je při uskladňování pro přirozené sušení (pod širým nebem) nutné dodržovat určité zásady. Z hlediska možného poškození je důležitá včasnost uložení do hraní. To platí zejména v teplém období u borového a bukového řeziva. Do jedné hraně, případně dvojhraně (dvojitě hraně) je nutné ukládat řezivo stejného druhu dřeva, stejné tloušťky, buď omítané nebo jen neomítané. Hraně jehličnatého řeziva se skládají zpravidla z materiálu stejné délky. U listnatého řeziva je možno, při dodržení základních zásad, uložit do jedné hraně řezivo různých délek. Řezivo má být před

uložením zbaveno pilin, písku nebo sněhu. Řezivo se doporučuje ukládat stranou bližší k dřeni (pravou stranou) nahoru zejména toho z důvodu, aby se v případném žlábků, vzniklém při sušení, nezdržovala srážková voda. Hráně mají mít svisle zarovnaná čela a boky. Hráň by měla být postavena bokem kolmo na směr v místě převažujícího proudění vzduchu (větru). Čela by měla být chráněna před přímým působením slunečních paprsků. Pokud se bude přirozené sušení kombinovat s umělým sušením, je vhodné brát při stavbě hráně v úvahu vnitřní rozměry sušárny. Velmi důležitá je vzdálenost spodní vrstvy řeziva od terénu, šířka a výška hráně, tloušťka prokladů a hustota proložení. Od země by mělo být řezivo vzdálené minimálně 40 centimetrů. Šířka hráně by neměla překročit 200 centimetrů. Výška hráně by neměla překročit trojnásobek šířky hráně. Mezery mezi boky řeziva mají tvořit svislé komínky, které umožňují vertikální proudění vzduchu v hráni. Svislé proudění vzduchu přes hráň je u přirozeného sušení zásadním faktorem, který ovlivňuje rychlost a kvalitu sušení. Po určitou dobu může vzduch po ochlazení proudit hrání směrem dolů, naopak po dlouhodobějším výraznějším snížení teploty okolního prostředí se může na určitou dobu směr proudění změnit. Při bezvětří nebo při mírném větru proudění vzduchu v hráni ve vertikálním směru převažuje. Vždy je však nutno dbát na včasné uložení řeziva do proklady proložených hrání, aby nedošlo k jeho poškození (zamodráání, zapaření). Přímému působení slunečního záření na uskladněné řezivo bráníme pomocí nátěrů nebo zastíňováním čel. Vznik čelních výsušných trhlin se dále eliminuje pomocí různých typů zarážecích elementů. Doporučuje se hráně zastřešovat mobilními stříškami nebo řezivo ukládat pod pevné přístřešky a větrané kolny. Nedoporučuje se na venkovním skladu přirozeně sušit řezivo déle jak dvě, zcela výjimečně sezóny tři. Delším skladováním na otevřeném prostranství může dojít k významnému zhoršení kvality uloženého dřeva (hmyz, barevné změny, plísně, trhliny). Kvalita přirozeně vysušeného řeziva může být vysoká. Přispívá k tomu mikroklima uvnitř hráně nebo skladu a neustálé střídání vnějších podmínek sušení (klimatických podmínek) během dne i roku. V důsledku akumulace tepla vodou obsaženou ve dřevě nebo v důsledku odpařování vlhkosti, se potom může lišit teplota a vlhkost uvnitř hráně od teploty a vlhkosti v jejím okolí. Vzniklé mikroklima napomáhá sušenému materiálu lépe se vyrovnávat se změnami teploty a vlhkosti v okolí hráně v průběhu dne. Výsledkem častého střídání parametrů vnějšího prostředí může být zmenšení zbytkového napětí (zkornatění) a nižší citlivost vysušeného dřeva (rozměrová stabilita) na změny vlhkosti a teploty v okolí hotových výrobků (hudební nástroje). Naopak při nedodržení zásad platných pro přirozené sušení může být dřevo i při přirozeném sušení vážně poškozeno (Peleška 1963, Trebula 1996, FPL 1999, ČSN 49 0650). Jistou nevýhodou přirozeného sušení je nemožnost provedení tepelné sterilizace dřeva. Dřevo potom může obsahovat zárodky dřevokazného hmyzu a plísní. Přirozené sušení řeziva lze kombinovat s umělým sušením. Rozměry hráně by proto měly odpovídat rozměrům sušárny pro umělé sušení.

### **3.1.2 Umělé sušení řeziva**

Tento způsob sušení řeziva spočívá v cíleně řízeném snižování vlhkosti dřeva v tepelně a vlhkovně izolovaném uzavřeném prostoru (sušárně řeziva) na požadovanou konečnou vlhkost. Provádí se v zařízeních, v nichž je možno ovlivňovat parametry sušícího prostředí (teplota, relativní vlhkost, rychlost proudění a tlak). U většiny zařízení na sušení řeziva převažuje významně konvekční ohřev před ohřevem kondukcí nebo radiací. Většina sušáren řeziva pracuje při normálním atmosférickém tlaku vzduchu 101,3 kPa (na hladině moře) (kondenzační, teplovzdušné komorové a tunelové sušárny, malé mikrovlnné sušárny). Menší část sušáren řeziva pracuje při sníženém tlaku sušícího prostředí uvnitř hermeticky uzavřeného prostoru (vakuové sušárny). Umělé sušení lze uplatnit také pro předsoušení dřeva na požadovanou vlhkost (30 až 20 %) (Krečetov 1954, Kafka 1989, FPL 1999, Keey 2000, ON 49 0651). Vlhkost sušícího prostředí v komorách s konvekčním ohřevem se reguluje



odváděním vlhkého vzduchu mimo vnitřní (pracovní) prostor sušárny, přiváděním vodní páry nebo rozstříkáváním vody pomocí trysek. Teplota je ovlivňována přívodem topného média do radiátoru topení, případně odváděním části teplého vlhkého vzduchu. Sušší teplý vzduch je od radiátoru (výměníku) k sušenému řezivu dopravován pomocí ventilátorů. Radiální nebo axiální (v současnosti častější řešení) ventilátory poháněné elektromotory zajišťují přenos tepla na dřevo pomocí konvekce sušícího prostředí, umožňují odvádění odpařené vlhkosti z prostoru hráně a nasávají z vnějšího prostředí „čerstvý“ vzduch s nižší vlhkostí. Rychlost sušení v tomto případě ovlivňují v rámci struktury dřeva většinou proti sobě působící gradienty teploty a vlhkosti.

Vlastní sušení v komoře s konvekčním ohřevem řeziva v prostředí vzduchu o určité vlhkosti probíhá tak, že po nasátí suchého „čerstvého“ vzduchu a jeho průchodu okolo radiátoru vzroste jeho teplota a schopnost přijímat vodní páru. Teplý suchý vzduch následně prochází hrání řeziva, kde odevzdává teplo, potřebné na odpařování vody ze dřeva a absorbuje vodu odpařenou ze dřeva. Jeho teplota postupně klesá. Následně může být část tohoto vlhkého vzduchu vyfukována (vypouštěna) z vnitřního prostoru sušárny, část se zpravidla mísí s „čerstvým“ sušším vzduchem nasávaným z okolí komory. Nevýhodou konvekčního ohřevu jsou ztráty způsobené tím, že než dojde k vlastnímu ohřevu dřeva, musí se napřed ohřát sušící prostředí, konstrukce a zařízení sušárny, a také to, že část nevyužitého tepla je mnohdy odváděna bez užitku výfukovými komíny.

Moderní sušárny mají možnost jak regulace počtu otáček, tak směru otáčení lopatek ventilátorů (reverzace). To slouží ke snížení spotřeby elektrické energie a ke zvýšení kvality vysušeného řeziva (rovnoměrnější rozložení konečné vlhkosti mezi jednotlivými kusy v hrání). Vzhledem k tomu, že objem odpařené vody v čase dosažením meze hygroskopicity klesne, je možno z důvodu úspory elektrické energie u teplovzdušných sušáren s konvekčním ohřevem počet otáček v této fázi procesu snížit. Změna smyslu otáček ventilátorů potom zajistí rovnoměrnější rozložení vlhkosti uvnitř dávky (vsázky) sušeného řeziva. Výfukové komíny mohou být osazeny speciálními výměníky (rekuperačními jednotkami), které využívají část odpadního tepla k ohřevu čerstvého vzduchu nasávaného do sušárny. Kromě klasické neprůchozí komory mohou být sušárny řeziva i průchozí nebo delší tunelové konstrukce s dopravníkem.

Menší část sušáren pracuje v podmínkách sníženého tlaku prostředí (vakuové sušárny). U tohoto způsobu je rychlost sušení pozitivně ovlivněna zvýšeným pohybem vody (difúzí) způsobeným vyšším gradientem tlaků. Vakuové sušárny mohou využívat konvekční, kondukční a dielektrický přenos tepla na dřevo. Vlhkost zkondenzovaná na chladicí soustavě nebo výparníku tepelného čerpadla je následně z hermeticky uzavřeného prostoru odstraňována (Krečetov 1954, Trebula 1996, Keey 2000). V minulosti byly sušárny řeziva velmi často ovládány ručně. Později řízeny pomocí jednoduchých mechanických strojků. V současnosti se uplatňují především poloautomatické a plně automatizované systémy řízení, kontroly a záznamu procesu umělého sušení řeziva, včetně možnosti úprav i zadání vlastních parametrů sušícího procesu, či sledování a ovládání procesu sušení ze vzdáleného místa. Z hlediska možné sterilizace řeziva je důležité, aby mohlo být v daném zařízení dosaženo uprostřed dřeva teploty nejméně 56 °C po dobu 30 minut. Některé níže uvedené způsoby sušení nejsou z tohoto pohledu pro toto ošetření vhodné.

### 3.1.2.1 Umělé předsoušení řeziva

Umělé předsoušení je způsob snižování vlhkosti na 30 až 20 %, který se uskutečňuje zpravidla ve velkých komorách vybavených ventilátory při teplotách do 40 °C (nízkoteplotní sušení). Umělé předsoušení pomáhá vyrovnávat výpadek produkce přirozeného předsoušení v zimě a umožňuje pravidelnější zásobování zpracovatelů předsušeným řezivem. Díky poměrně mírným podmínkám sušení, existuje v tomto případě zcela výjimečně možnost

sušení různých druhů dřev různé tloušťky a různé vlhkosti současně. Rychlost sušení je nízká, kvalita sušení je naopak poměrně vysoká. Uvedené podmínky nejsou vhodné pro sušení na nižší konečnou vlhkost dřeva. Proto po dosažení výše uvedené hranice vlhkosti dřeva není už rentabilní v sušení řeziva v tomto typu sušáren dále pokračovat. Jedná se o velkokapacitní tepelně izolované komory, které jsou vybaveny ventilátory, případně přídavným topením. Odpařená vlhkost je odváděna odvětrávacími otvory. S ohledem na velmi mírné podmínky sušení není zpravidla tento typ komor vybaven vlhčením (Trebula 1996, FPL 1999). Také umělé předsoušení řeziva je vhodné kombinovat s dosoušením v teplovzdušných komorových sušárnách, ve vysokoteplotních sušárnách nebo v mikrovláknových sušárnách, případně pokud je při sušení využíván kontaktní ohřev (vakuové sušárny).

### 3.1.2.2 Kondenzační sušení řeziva

Koncepčně jsou k předsušárnám řeziva velmi blízko komorové kondenzační sušárny. Při tomto způsobu sušení se maximální teploty sušícího prostředí pohybují okolo 50 °C. Zpravidla bývá tento způsob sušení označován jako nízkoteplotní sušení řeziva. U tohoto typu komorových sušáren se nevypouští odpařená vlhkost do prostředí výfukovými komínky, ale ke kondenzaci vzdušné vlhkosti se využívá chladicí zařízení. Vzniklý kondenzát je potom odváděn mimo sušárnu. Pohyb vzduchu je zajištěn zpravidla pomocí axiálních ventilátorů. Uvnitř konstrukčně starších tepelně i vlhkově izolovaných komor byla umístěna kondenzační jednotka a radiátor. Nové typy kondenzačních sušáren využívají ke snížení vlhkosti sušícího prostředí a k jeho ohřevu tepelné čerpadlo. Tepelná čerpadla používaná při sušení řeziva se skládají z výparníku, kompresoru, kondenzátoru a expanzní trysky. Uvnitř uzavřeného obvodu tepelného čerpadla je napuštěno chladivo. S ohledem na vlastnosti chladiva by teplota v komoře neměla překročit určitou bezpečnou teplotu. Ta by mohla znamenat var chladiva a poškození systému. Skříň obsahující tepelné čerpadlo je zpravidla z vnějšku pevně připojena ke komoře sušárny. Vlhký teplý vzduch z komory sušárny je v určitých fázích sušení nasáván do skříně tepelného čerpadla. Na výměníku s chladným povrchem (výparník) vlhkost odpařená z řeziva zkondenzuje. Tento výměník současně převezme část tepla, které by jinak bylo vypuštěno společně s vlhkým vzduchem do vnějšího prostředí. Díky tomu se chladivo uvnitř uzavřeného obvodu zahřeje, přemění se na páru a může tak být následně pomocí kompresoru stlačeno, čímž se jeho teplota ještě zvýší. Ve druhém výměníku (kondenzátor) je teplo z chladiva předáno do odvlhčeného vzduchu, který je následně vháněn zpět do sušárny. Díky tomu se chladivo ve formě páry v tomto výměníku ochladí (zkondenzuje) a putuje směrem k expanzní trysce. Průchodem přes expanzní trysku se chladivo ještě více ochladí a putuje směrem k výparníku (Trebula 1996).

Tento způsob sušení bývá označován jako měkký, výsledná kvalita takového sušení je poměrně vysoká. Proto je tento typ sušáren vhodný i pro předsoušení kvalitního řeziva nebo řeziva velké tloušťky. Rychlost sušení není vzhledem k uvedeným podmínkám vysoká a sušení na nižší konečnou vlhkost je značně zdlouhavé. Výhodou kondenzačních sušáren je, že hlavním zdrojem tepla může být pouze tepelné čerpadlo, napájené elektrickým proudem. Nevýhodou může být, že v tomto typu sušáren se s ohledem na nízké provozní teploty, většinou nedá provádět tepelná sterilizace řeziva. Pro fázi ohřevu řeziva nebo pro mírné zvýšení teploty sušícího prostředí, může být použito přídavné elektrické topení nebo jiný zdroj s nižší teplotou. V případě požadavku na nízkou konečnou vlhkost u dřeva s vysokou hustotou může být proces sušení řeziva u kondenzačních sušáren poměrně zdlouhavý (Trebula 1989, Dejmal 1995, Dejmal 2002). Podobně jako přirozené předsoušení lze i umělé předsoušení řeziva kombinovat s umělým dosoušením (teplovzdušným, vysokoteplotním, mikrovláknovým nebo u vakuových sušáren s kontaktním ohřevem).

### 3.1.2.3 Solární sušení řeziva

Speciálním druhem komorových sušáren jsou sušárny solární. U toho prozatím méně rozšířeného typu sušáren se k ohřevu sušícího prostředí uplatnila solární energie. Sušárny mohou využívat sluneční energii buď přímo (typ skleník) nebo pomocí kolektorů a solárních článků (typ komora). Ve všech případech jsou však v konstrukci zabudovány ventilátory, které zajišťují rovnoměrné proudění vzduchu vnitřním prostorem sušárny a speciální klapky pro přívod suchého vzduchu a odvod odpařené vlhkosti (Khater 2004). Konstrukce je významně ovlivněna lokalitou. V podmínkách zemí blízkých rovníku je možno uplatnit sušárny skleníkového typu bez speciální tepelné izolace. Naopak se vzdáleností od rovníku se konstrukce solárních sušáren může měnit. Konstrukce je potom velmi podobná klasické tepelně izolované komorové sušárně, s výměníky tepla využívajícími solární energii (Zejda 2011). Součástí nebo příslušenstvím některých sušáren mohou být speciální prvky sloužící k akumulaci sluneční energie. Takto získanou energii lze uplatnit v době, kdy není sluneční záření dostatečně intenzivní. Solární sušárny mohou být řízeny plně automaticky pomocí výpočetní techniky (Steinmann 1995). Velikost solárních sušáren je velmi variabilní. Od malých skleníků a komor až po skleníky velikosti hangáru. Tepelně izolované solární sušárny mají zpravidla menší až střední kapacitu. S ohledem na to, o jak sofistikovaná zařízení se může jednat, je kvalita sušení podobná kvalitě řeziva sušeného v předsušárnách nebo komorových sušárnách. Při nedodržení zásad velmi podobných pro sušení v komorových sušárnách může dojít i k poškození sušeného řeziva (Khater 2004, Bekkioui 2010).

### 3.1.2.4 Teplovzdušné sušení řeziva

V současnosti je nejrozšířenějším způsobem umělého sušení řeziva sušení teplovzdušné. Je to způsob sušení při němž je v uzavřené izolované komoře sušícím prostředím při normálním atmosférickém tlaku vzduch o teplotě od 50 do 100 °C s určitým obsahem vlhkosti (ČSN 49 0651). Rychlost vzduchu proudícího v komoře při teplovzdušném sušení se zpravidla pohybuje od 1,5 do 2 m.s<sup>-1</sup>. Podle parametrů sušícího prostředí rozeznáváme sušení měkké a sušení tvrdé. Pro měkké sušení je charakteristická vyšší relativní vzdušná vlhkost a nižší teplota vzduchu, naopak pro tvrdé sušení (tvrdší podmínky) je typická vyšší teplota a nižší relativní vlhkost vzduchu. Čas tvrdého sušení je sice kratší, ale jakost vysušeného materiálu je horší. Výsledkem měkkého sušení je kvalitně vysušené dřevo s minimálním výskytem vad (kolaps, deformace, zkornatění a trhliny). Proces sušení je ovlivňován zejména pomocí teploty a obsahu vodní páry v sušícím prostředí. Ten lze určit na psychrometru z rozdílu mezi teplotou suchého a mokrého teploměru (psychrometrický rozdíl) a přiložených tabulek. Postupné cílené snižování vlhkosti vzduchu (sušícího prostředí) při konstantní (rostoucí) teplotě se v průběhu procesu sušení v teplovzdušné sušárně projeví poklesem teploty na mokřím teploměru psychrometru, umístěném uvnitř komory. Čím je psychrometrický rozdíl (rozdíl teploty suchého a mokrého teploměru psychrometru) větší, tím je vlhkost vzduchu nižší. Suší se v těsně uzavřených komorách, kde je materiál v průběhu sušení uložen v proložených hraních na jednom místě. Z manipulačních (organizačních) důvodů mohou být komory řešeny i jako průchozí. Vlhkost odpařená ze dřeva se vypouští (vyfukuje) do okolního prostředí. Teplo do radiátorů středních a velkých teplovzdušných komorových sušáren řeziva je u větších dřevařských provozů zpravidla dodáváno přímo z kotelen uzpůsobených ke spalování dřevního odpadu. Součástí dodávky menších sušáren může být vlastní kotel. U některých sušáren je odpadní teplo zpětně získáváno pomocí rekuperačních jednotek umístěných na straně výfuku vlhkého, ale stále ještě relativně teplého vzduchu z komory. Řešením je také přepouštění tohoto vzduchu do vedlejší komory, kde může být využitý, jako sušící prostředí v prvních fázích jiného procesu. Pro případ potřeby rychlého zvýšení vlhkosti sušícího prostředí jsou komory vybaveny vlhčícími tryskami pro rozprašování vody nebo perforovanou ocelovou trubkou pro přívod syté páry. U těsně a dobře izolované sušárny by se

vzduch v průběhu vlastního sušení měl zvlhčovat minimálně, například jen ve fázi ohřevu řeziva. Nadměrné vlhčení sušícího prostředí prodlužuje čas sušení, prodražuje proces a může dokonce zhoršit kvalitu vysušeného řeziva. Komorové teplovzdušné sušárny s konvekčním ohřevem mají široké uplatnění od výroby hudebních nástrojů, přes výrobu nábytku až po materiál na dřevostavby. Suší se všechny druhy dřev všech dimenzí (Jirů 1959, Kruml 1964, FPL 1991, Drahoš 1996, ON 49 0651).

Pro velké objemy řeziva stejného typu, především jehličnatého, zejména pro stavební účely, lze použít průchozí tunelové (kanálové) sušárny. Sušený materiál je zde postupně posouván pomocí dopravního zařízení sušícím prostředím až na druhý (suchý, výstupní) konec tunelu. Na vstupu do tunelu (mokrý část) jsou parametry sušení mírné, ale s délkou kanálu se postupně mění na tvrdší. Teplota prostředí se v tomto případě pohybuje okolo 70 °C. Sušení je díky zpravidla menšímu psychrometrickému rozdílu poměrně měkké. Rychlost proudění vzduchu je o něco vyšší než u sušáren komorových ( $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Některé typy tunelových sušáren jsou rozděleny do více zón za sebou. To umožňuje lepší regulaci procesu v jednotlivých částech sušárny. Výhodou tunelových sušáren řeziva s konvekčním ohřevem je především lepší technologická návaznost na další výrobu, zajišťující stabilní objem vysušeného řeziva obdobné kvality pro konkrétní použití (Welling 1995, Trebula 1996). U nás se doposud tento typ sušáren pro sušení řeziva nepoužíval, patrně z toho důvodu, že se v našich podmínkách průmyslová výroba dřevostaveb začala rozvíjet podstatně později a potřeba materiálu je prozatím relativně nízká. Naopak zejména v severských státech se s tímto typem sušáren lze setkat poměrně často.

Proces teplovzdušného sušení řeziva se zahájí určením počáteční vlhkosti dřeva. Nejpresnějším způsobem stanovení počáteční vlhkosti dřeva je váhová metoda (ČSN EN 13183-1). Malé vlhkostní vzorky pro určení počáteční vlhkosti se odeberou z koncové části řeziva ve vzdálenosti cca 300 mm od čela, v případě krátkých sortimentů ze středu délky. Ostatní metody se s ohledem na vysokou počáteční vlhkost dřeva nedoporučují. Podle druhu a rozměrů řeziva a podle požadavků na výslednou konečnou jakost (vlhkost, zkornatění) se stanoví podmínky sušení. Poté se provede kontrola technického stavu a čistoty sušárny a vnitřní prostor sušárny se podle pokynů výrobce sušárny zaveze hráněmi (dávkou). V případě sušení na vysokou jakost se doporučuje nainstalovat do boků hráně sušící vzorky (desky), které se v průběhu procesu sušení váží. Na horní vrstvu řeziva se může umístit závaží nebo přítlačné zařízení, aby eliminovalo příčné a podélné zborcení. Případně se hráně opatří stahovacími popruhy (ty je však nutno pravidelně dotahovat). Na řezivo se nainstalují příslušná teplotní a vlhkostní čidla, prostor okolo hrání se podle instrukcí výrobce utěsní a komora se uzavře. Následuje ohřev řeziva, vlastní sušení, zpravidla konečné ošetření (egalizace a zlahodnění), ochlazování. Rozsah konečného ošetření (zvýšení vlhkosti prostředí uvnitř sušárny) je dán požadovanou kvalitou řeziva, zjištěným vlhkostním spádem a stavem zkornatění (zbytkovým napětím). Ovládání a kontrola parametrů uvnitř sušárny a sledování stavu sušeného materiálu se děje buď plně automaticky nebo za pomoci kvalifikované obsluhy (poloautomaticky). Parametry sušícího prostředí jsou uloženy v příslušném softwaru řídicího počítače nebo je obsluha nastavuje podle příslušných tabulek a udržuje pomocí poloautomatické regulace. Parametry sušícího (vnitřního) prostředí sušárny jsou zpravidla měněny podle aktuální vlhkosti sušeného dřeva nebo podle času od zahájení úseku vlastního sušení. Existují i jiné způsoby řízení procesu sušení, založené například na sledování aktuálního vlhkostního spádu (rozdíl ve vlhkosti na průřezu desky), na průběžném sledování úbytku hmotnosti dávky sušeného dřeva nebo na základě sledování objemu vznikajícího kondenzátu. Neustálým zdrojem pro výzkum je potom nalezení optimálního stavu, tj. dosažení co možná nejkratšího času procesu sušení při požadované kvalitě vysušeného řeziva.

Po postupném ochlazení na následuje přesun vysušeného řeziva ze sušárny. Zejména v zimním období by měl být rozdíl mezi teplotou řeziva a teplotou prostředí, kam bude řezivo vyvezeno sledován, aby nedošlo k možnému poškození řeziva povrchovými trhlinami.

Na závěr procesu sušení je provedena kontrola výsledné kvality (jakosti) vysušeného řeziva. Rozhodujícími měřítky kvality sušení jsou podle současných kritérií především konečná vlhkost dřeva a zbytková napětí. Konečná vlhkost se odhaduje zpravidla pomocí odporových nebo kapacitních vlhkoměrů. Zbytkové napětí (stav zkornatění) se stanovuje obvykle pomocí jednoduchých experimentálních zkoušek, kdy se vysušený materiál podle platných norem rozřeže na zkušební tělíska a podle velikosti deformace se vyhodnotí. Dále se doporučuje stanovit odchylky od žádané vlhkosti a kolísání konečné vlhkosti řeziva v hrani. Lze také posuzovat vlhkostní spád, rozsah a charakter trhlín, kolaps, ronění pryskyřice a barevné a tvarové změny. Vysušené jehličnaté řezivo by se mělo zpracovávat až po 24 hodinové aklimatizaci na vnější (výrobní) podmínky, listnaté dokonce až po 48 hodinách od vyvezení řeziva ze sušárny. Standardním sušením se rozumí sušení na žádanou vlhkost od 7 % do 18 %. Aby mohlo být sušení považováno za standardní, musí 93,5 % zkoumaných kusů vykazovat vlhkost mezi dovolenými limity. Pokud se zkornatění týká, tak dávka odpovídá standardnímu sušení, leželi-li stanovený stupeň zkornatění u 80 % zkoušených kusů uvnitř dovolených limitů (ČSN EN 13183-1, ČSN EN 14298).

### 3.1.2.5 Vysokoteplotní sušení řeziva

Vysokoteplotní sušení v komorách s konvekčním ohřevem řeziva je jedním z v poslední době poměrně často zmiňovaných způsobů snižování vlhkosti dřeva. Nejedná se však o způsob sušení nový. Princip vysokoteplotního sušení v přehřáté páře byl známý už v první polovině 20. století. Problematikou byla především regulace samotného procesu sušení v prostředí přehřáté vodní páry nebo směsi vzduchu a přehřáté páry (Kollmann 1951, Keylwerth 1952, Mathewson 1954, Kollmann 1961). Výhodou tohoto způsobu umělého komorového sušení řeziva je významné zkrácení času sušení. Vlastní vysokoteplotní sušení řeziva probíhá při teplotách od 100 do 130 (150) °C. Rychlost proudu vzduchu je vyšší než u teplotovzdušného sušení. Uvádí se hodnoty od 2 do 10 m.s<sup>-1</sup>. Pokud se suší řezivo o vysoké počáteční vlhkosti dřeva vysoko nad MH je proces sušení je rozdělen na dvě fáze. První fází je sušení dřeva o vlhkosti nad mezí hygroskopicity zpravidla při teplotách do 100 °C. Ve druhé (hlavní) fázi, probíhá sušení dřeva o vlhkosti pod mezí hygroskopicity při teplotách nad 100 °C. Ve fázi kdy se vlhkost dřeva dostane pod MH mohou být parametry sušícího prostředí kontrolovány podle teploty suchého teploměru psychrometru, protože teplota mokrého teploměru zůstává na bodu varu vody (je tedy nižší než teplota na suchém teploměru). U dřeva o vysoké počáteční vlhkosti by v případě zvýšení teploty nad 100 °C už v první fázi procesu sušení mohlo dojít k poškození struktury tlakem vznikající vodní páry. U špatně propustných dřev hrozí v počáteční fázi nebezpečí kolapsu nebo narušení struktury vodní parou tvořící se ve dřevě. Teplota mokrého teploměru se v hlavní fázi sušení drží okolo hodnoty blízké bodu varu vody. Určitým doprovodným rysem vysokoteplotního sušení je, že při něm dochází k významnějším chemickým změnám, které mohou trvale upravit fyzikální a mechanické vlastnosti vysušeného dřeva. Při tomto způsobu sušení zpravidla dochází k mírnému ztmavnutí odstínu dřeva a k odpaření části prchavých látek, zejména pryskyřice. V důsledku působení vysoké teploty začíná probíhat proces částečné hydrolýzy dřeva, což může vést k mírnému snížení počtu volných sorpčních míst. Tím je dosaženo snížení počtu volných hydroxylových skupin, tedy snížení rovnovážné vlhkosti vysušeného dřeva. Materiál může být nepatrně křehčí. Odpaří se také část prchavých složek dřeva (pryskyřice). Suší se zpravidla v prostředí přehřáté páry v hermeticky uzavřených, tepelně izolovaných a plně automatizovaných komorách v nerezovém provedení. Jakákoliv netěsnost konstrukce by mohla vést k nekontrolovanému sušení. Vysoká teplota v průběhu procesu sušení eliminuje

rozsah zbytkových napětí. Tento spíše tvrdší způsob sušení významně zkracuje dobu sušení, je vhodný především pro jehličnaté řezivo použité na stavební a truhlářské účely (Trebula 1989, Ressel 1999, Kivader 2012).

### 3.1.2.6 Dielektrické sušení řeziva při atmosférickém tlaku prostředí

Omezeně jsou k sušení menších objemů řeziva používány dielektrické sušárny, pracující při normálním atmosférickém tlaku vzduchu. Tento typ sušáren využívá k rychlému ohřevu vlhkého dřeva elektromagnetické vlnění o vysoké frekvenci. Se zvyšováním vlhkosti narůstá ve dřevě počet polárních částí, a v důsledku toho se zvyšuje i polarizace. Díky polarizaci molekul vody obsažené ve dřevě dochází k jejich vzájemnému tření. Během velmi krátké doby (sekundy) vzniká teplo a tvoří se vodní pára. Představa o využití elektrického pole o frekvenci 2 450 MHz a 915 MHz (mikrovlnného záření) pro ohřev (sušení) dřeva a podobných materiálů byla konkretizována v roce 1928 (FPL 1999, Torgovnikov 2000, Babiak 2000, Resch 2006). Proces sušení (mikrovlnné úpravy) dřeva lze ovlivňovat výkonem zdroje, úpravou rozměrů vlnovodu a rychlostí pohybu řeziva (dopravníku). Na proces mají dále vliv vlhkost a druh dřeva, rozměry a celkový objem současně sušeného materiálu.

Významnou předností aplikace mikrovln na dřevo je její nízká časová náročnost. Pro ohřev se využívá jevu, kdy se permanentní dipóly ve stejnosměrném elektrickém poli orientují do energeticky nejpříjemnější polohy. Při překonávání mezimolekulárních přitažlivých sil dochází k mezimolekulárnímu tření. Výsledkem je velmi rychlý ohřev materiálu, často v řádu několika sekund. Určitou nevýhodou je poněkud složitější, na prach a vlhkost citlivější konstrukce některých částí výrobních zařízení a možný problém s nerovnoměrným účinkem záření. Zdrojem mikrovlnné energie je elektronka speciální konstrukce – magnetron. Proud elektronů indukuje vysokofrekvenční kmity, které jsou odváděny vlnovodem směrem k dutinovému rezonátoru (kovová komora), kde je uloženo řezivo. U vlhkého dřeva je účinnost zařízení vždy poměrně vysoká (Vinden 2007). Mikrovlnami lze prohřát materiál daleko účinněji než je tomu v případě konvekčního nebo kontaktního ohřevu. Elektromagnetická energie o mikrovlnné frekvenci je schopna téměř současně rozkmitat molekuly vody v celém průřezu sušeného dřeva do hloubky několika centimetrů. V případě mikrovlnného ohřevu je sušené řezivo proloženo běžnými dřevěnými proklady, aby se mikrovlnné záření dostalo až k jednotlivým kusům řeziva v hrani. U radiových frekvencí proniká záření výrazně hlouběji bez potřeby řezivo prokládat.

Úroveň absorpce mikrovlnného záření závisí na orientaci vektoru elektrického pole vůči dřevním vláknům. Pokud je tento vektor rovnoběžný s dřevními vlákny, může být absorpce energie až dvojnásobná. Pokud se ale týká průniku vlnění do hloubky, tak pokud působí vektor elektrického pole kolmo na dřevní vlákna je průnik hlubší a k prohřátí dřeva dochází v řádu centimetrů (Klement 1995, Torgovnikov 1995, Torgovnikov 1997, Torgovnikov 2000). Vzhledem k tomu, že ohřev neprobíhá konvekčně ani kontaktně (od povrchu směrem dovnitř), ale prakticky současně v celém průřezu, je teplota v okolí nižší než v samotném dřevě. Výsledkem toho je souhlasný pohyb vlhkosti a teploty strukturou dřeva směrem k povrchu, což přispívá ke zrychlení procesu sušení. Rychlejší difúze vlhkosti směrem k povrchovým vrstvám dřeva má vliv na snížení zbytkových napětí a eliminaci povrchových trhlin. V případě, že se dielektrický ohřev a následné sušení uskutečňují v prostředí sníženého tlaku vzduchu, je intenzita pohybu vlhkosti přes dřevo ještě vyšší.

Základ zařízení pro mikrovlnnou úpravu dřeva (základní mikrovlnná sestava) tvoří: magnetron (zdroj), vlnovod pro rozvedení elektromagnetických vln a kovový box (dutinový rezonátor). Mikrovlnná sušárna řeziva pracující při normálním tlaku vzduchu se potom skládá z dutinového rezonátoru, vlnovodu, magnetronu a ventilátoru pro odsávání odpařené vody. Chlazení magnetronu vyžaduje, aby se jeho žebra pravidelně čistila od dřevního prachu, aby

nedošlo k jeho přehřátí nebo dostatek vhodné chladicí kapaliny (voda). Dielektrický ohřev lze na řezivo aplikovat i při sníženém tlaku prostředí (vakuové sušárny).

Určitou nevýhodou mikrovlnného zdroje může být nerovnoměrný ohřev dřeva po průřezu a délce sušeného dřeva v důsledku vysoké počáteční vlhkosti dřeva (utlumení v povrchových vrstvách), nerovnoměrně rozložené hustoty a vlhkosti dřeva a různé vzdálenosti jednotlivých částí materiálu od zdroje. Mikrovlny se rezonátorem pohybují poměrně neuspořádaně, mohou se vzájemně rušit nebo naopak kumulovat. Soustředěním energie do jednoho místa může dojít při vlhkosti pod 7 % k místnímu (Hot Spots) nebo celkovému zahoření struktury dřeva. Z hlediska účinnosti mikrovlnného ohřevu se jako vhodné ukazuje, dřevo o vysoké počáteční vlhkosti (nad MH) předsušit jiným způsobem a pomocí mikrovln dosušit na potřebnou žádanou vlhkost (Simpson 1980, Trebula 1996).

Důležitým faktorem aplikace mikrovln v dřevozpracujícím odvětví je otázka bezpečnosti a ochrany zdraví při práci. V případě úniku do okolí mohou mikrovlny ohrozit zdraví člověka, případně narušit telekomunikační provoz. Při dodržení všech bezpečnostních pravidel (těsnost sušárny, jistící prvky), je mikrovlnné sušení dřeva poměrně bezpečné.

### 3.1.2.7 Vakuové sušení řeziva

Kromě již uvedených způsobů umělého sušení dřeva při běžném atmosférickém tlaku vzduchu se uplatňuje sušení při sníženém tlaku prostředí – vakuové sušení řeziva. Jedná se o sušení v tepelně izolovaných zařízeních pro střední a menší objemy sušeného řeziva. Snížením tlaku v okolí sušeného dřeva se několikanásobně zrychluje pohyb vlhkosti (difúze) přes strukturu dřeva. Toho lze docílit umístěním řeziva do hermeticky uzavřeného prostoru opatřeného vývěvou. Vývěva odčerpává z uzavřeného prostoru vzduch či jiné plyny a vytváří tak částečné vakuum. Vzhledem k tomu, že při nižším tlaku prostředí v oblasti hrubého vakuu (mírného podtlaku 80 kPa) se snižuje bod varu vody přibližně na 47,3 °C, probíhá proces vakuového sušení při teplotách podstatně nižších jako je tomu například u teplovzdušného sušení. Jedná se tedy o způsob sušení, který se řadí spíše mezi nízkoteplotní. V důsledku podtlaku dochází ve vakuových sušárnách řeziva ke zvýšené difúzi vlhkosti dřevem, což se projevuje výrazným zkrácením času sušení. Rychlý pohyb vlhkosti směrem k povrchu dřeva a včasná náhrada vlhkosti odpařené z povrchových vrstev dřeva zajišťuje poměrně vysokou kvalitu vysušeného řeziva bez povrchových trhlin. Způsob sušení řeziva při sníženém tlaku prostředí je vhodný pro materiál větší tloušťky a prakticky pro všechny druhy dřev. Pouze v případě vakuového sušení špatně propustných dřev může hrozit nebezpečí vzniku kolapsu. Další výhodou tohoto způsobu sušení je, že díky nižším teplotám je vakuové sušení řeziva provázáno minimálními barevnými změnami sušeného dřeva.

Vakuové sušárny řeziva jsou hermeticky uzavřená zařízení většinou s poměrně malou kapacitou (1 až 10 m<sup>3</sup>) řeziva, zpravidla tubusového (válcového) tvaru, která jsou vybavena zdrojem pro ohřev dřeva (radiátory, kontaktní vyhřívací desky, dielektrický ohřev), vývěvou a zařízením pro kondenzaci a odvod odpařené vlhkosti. Spíše výjimečně existují vakuové sušárny s kapacitou až 60 m<sup>3</sup> řeziva. Vzhledem k tomu, že se při vakuovém sušení uplatňují nižší teploty, mohou být novější typy vakuových sušáren osazeny tepelným čerpadlem. V případě konvekčního ohřevu je sušárna vybavena radiátory a ventilátory. Řezivo je proloženo proklady stejně jako při klasickém sušení v klasických komorách s konvekčním ohřevem řeziva. V průběhu procesu sušení se cyklicky střídají fáze ohřevu při normálním tlaku vzduchu a sušení ve vakuu až do dosažení konečné požadované. Sušicím prostředím může být i přehřátá pára. Rychlost ohřevu i rychlost sušení se tím ještě zvýší. Teplota je však díky sníženému tlaku prostředí snížena (Ressel 1999). V případě kondukčního ohřevu jsou mezi jednotlivými vrstvami řeziva umístěny kontaktní vyhřívací desky. Vakuum tak může být vytvořeno trvale po celou dobu procesu sušení (kontinuální proces). Také dielektrický ohřev se může uskutečňovat v prostředí vakuu. Proces potom probíhá kontinuálně bez potřeby měnit

tlak v zařízení v průběhu procesu sušení dřeva (Trebula 1989). První patent využívající kombinaci vysokofrekvenčního ohřevu a sníženého tlaku prostředí pro sušení dřeva byl vydán už v roce 1945 (Luth). Kromě mikrovlnného ohřevu, kdy elektromagnetické vlnění proniká do vlhkého dřeva v řádu centimetrů, je k sušení sortimentů větší tloušťky využíván ohřev radiofrekvenční, který umožňuje prohřátí dřeva do hloubky v řádu metrů. Při mikrovlnném sušení dřeva je řezivo proloženo proklady, při radiofrekvenčním ohřevu je materiál v sušárně uložen bez prokladů. Při ohřevu dřeva pomocí radiové frekvence o kmitočtu 13,56 MHz materiál proložen není, protože toto vlnění proniká do materiálu v řádu metrů. Neproložený materiál je uložen mezi dvěma kontaktními plošnými elektrodami. Jeho uplatnění v praxi může být omezeno možnostmi elektrické sítě. Kombinace dielektrického ohřevu dřeva se sníženým tlakem prostředí je jedním z nejrychlejších způsobů sušení vůbec. Má však dosud některé nedostatky, pramenící především z nerovnoměrnosti mikrovlnného ohřevu dřeva.

Méně využívaným způsobem sušení dřeva ve vakuu je sušení vymrazováním (lyofilizací) dřeva. Dřevo menších rozměrů (zpravidla archeologické mokré a poškozené dřevo) zmražené na teplotu až  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  je sušeno v prostředí se sníženým tlakem. Postup je založen na sublimaci zmrzlé vody při nízkém tlaku a teplotě. V důsledku skupenské přeměny ledu na páru dochází k velmi šetrnému sušení bez velkých napětí a deformací. Při tomto způsobu sušení dřeva je zmiňován menší rozdíl ve velikosti tangenciálního a radiálního sesychání. Dřevo v průběhu procesu sušení méně praská a méně se bortí. Celkové objemové seschnutí je však větší než v jiných případech umělého sušení (Trebula 1996).

### 3.2 Hydrotermická úprava dřeva

Hydrotermická úprava je charakteristická společným působením tepla a vodní páry nebo tepla a vody na dřevo. Zvyšování vlhkosti do meze hygroskopicity, především v důsledku přítomnosti vody vázané v oblasti celulózových řetězců, může vyvolat snížení pevnosti dřeva. Působení vyšší teploty ovlivňuje plasticitu ligninu a degradaci hemicelulóz. Výsledkem procesu, při němž působí vlhkost a teplota současně, je dosažení dočasných nebo trvalých změn vlastností dřeva. Podstatou reverzibilních (dočasných) změn jsou fyzikální procesy. K ireverzibilním (nevratným) změnám dochází převážně v důsledku změn v chemické struktuře (Trebula 1989, FPL 1999). Dočasnou změnou je přechodné zvýšení plastické deformace dřeva. Tato změna je důležitá pro dělení dřeva při výrobě dýh nebo při ohýbání, případně lisování dřeva. Trvalou změnou může být uvolnění vnitřních napětí, snížení pevnosti dřeva v tahu, tlaku a ohybu, změny v chemickém složení a změny v barvě dřeva (oxidace). V některých případech se paření uplatňuje, jako úprava kvalitního řeziva těsně před vlastním sušením (Kollmann 1951, Kafka 1989, Trebula 1996, Král 1999, Riel 2002, FPL 1999, Horáček 2008). Při hydrolyze dřevních polysacharidů vznikají monomerní a oligomerní produkty, které následně podléhají různým chemickým reakcím za vzniku množství nových chemických sloučenin. Při hydrotermickém zatěžování dřeva teplotami nad  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  jsou za nejméně stabilní považovány hemicelulózy. V důsledku paření dřeva dochází v rámci termooxidace a hydrolyzy u hemicelulóz a celulózy ke snížení stupně polymerizace. Nejodolnější složkou dřeva při současném působení vlhkosti a tepla je celulóza. Přesto i v tomto případě dochází k částečné změně polymerizačního stupně; především z důvodu odbourání amorfní části celulózy. V důsledku procesu hydrolyzy dřeva přechází určitá část dřeva do roztoku. V hydrolyzátu byly zaznamenány monosacharidy a nízkomolekulový lignin. Kyselost hydrolyzátu (pH 3 až 4) roste díky přítomnosti kyseliny mravenčí, levulové a octové, která vzniká deacetylací hemicelulóz (Bučko 1995). Obsah látek v hydrolyzátu současně závisí na obsahu chemických látek podle druhu stromu i lokality, kde strom vyrostl. V případě klasické hydrotermické úpravy dřeva za účelem dočasné nebo trvalé změny vlastností se tento proces skládá z ohřevu, vlastní hydrotermické úpravy, ochlazování a egalizace. Ve fázi ohřevu se zahřívá konstrukce zařízení, pracovní prostředí, případně voda



pro nepřímé paření. Ve druhé fázi probíhá ohřev dřeva v celém průřezu na požadovanou teplotu při otevřeném přívodu topného média. Poslední úsek procesu začíná uzavřením přívodu topného média. Po určitou dobu tak probíhá úprava v důsledku setrvačnosti procesu s využitím tepla naakumulovaného v celém systému. Následně dochází k postupnému ochlazení na teplotu, kdy lze materiál bezpečně vyjmout ze zařízení. V úseku egalizace dochází k postupnému vyrovnávání vlhkosti na průřezu hydrotermicky upraveného dřeva (Král 1999, Riel 2002). O celkovém výsledku procesu rozhoduje kromě vlastního materiálu a jeho rozměrů vlhkost a teplota, tlak, rychlost proudění, použité médium a čas po který je dřevo účinkům vnějšího prostředí vystaveno. U jednotlivých způsobů hydrotermické úpravy dřeva se mohou podmínky částečně lišit.

### **3.2.1 Paření a vaření dřeva**

Jedná se o procesy hydrotermické úpravy dřeva, kdy se na masivní dřevo o určité počáteční vlhkosti záměrně působí po určitou dobu teplou (horkou) vodou nebo sytou vodní párou při určitém tlaku prostředí. Cílem těchto procesů je změna fyzikálních, chemických a mechanických vlastností dřeva. Tyto změny mají buď přechodný (vratný) nebo trvalý (nevratný) charakter (Vaněk 1952, Trebula 1996, Riel 2002). Čím je čas paření delší, tím více se snižuje pevnost dřeva. Největší pokles pevnosti nastává už během prvních 30 minut trvání procesu. Ukázalo se, že při vlhkosti dřeva vyšší jak 20 % se s nadměrným prodlužováním doby paření snižuje hodnota celkové deformace. Dlouhodobé paření při nižších teplotách (do 100 °C) může mít za následek zvýšení velikosti rozměrových změn při sesychání nebo bobtnání dřeva. Naopak paření při velmi vysokých teplotách (130 °C) může, díky trvalým chemickým změnám, snížit rovnovážnou vlhkost dřeva, čímž jsou trvale eliminovány rozměrové změny (FPL 1999, Riel 2002, Brabec 2013).

V důsledku částečné hydrolyzy pařeného dřeva dochází ke vzniku kyselin (octová, mravenčí, levulová) a vyplavení některých vyluhovatelných doprovodných látek (třísloviny, jádrové látky, škroby, zásobní látky, látky dřevo zbarvující, minerální látky) a k odpaření části prchavých látek (aromatické alkoholy, terpeny). Před vypuštěním do kanalizace je důležité některé tyto látky neutralizovat. Doprovodným projevem paření nebo vaření dřeva může být i typický nepříjemný zápach způsobený zpravidla vznikem kyseliny octové a 2-furaldehydu.

Dřevo se paří v prostředí syté vodní páry při normálním atmosférickém tlaku nebo při zvýšeném tlaku prostředí při teplotách až do 120 °C. Paření se uskutečňuje v tepelně izolovaných jámách (bazénech), komorách a autoklávech (retortách) v antikorozi úpravě. Přímé paření je prováděno přívodem nízkotlaké syté páry zbavené oleje o mírném přetlaku 0,01 až 0,02 MPa přímo do uzavřeného pracovního prostoru. Ukázalo se, že zvyšování tlaku nijak zásadně nezlepšuje výslednou plastifikaci. Nevýhodou přímého paření dřeva je náchylnost k tvoření čelních trhlin. Výhodou je rychlost aplikace. Při nepřímém paření jsou uvnitř zařízení jedna nebo více pařících van s topnými tělesy. Tyto vany jsou napuštěny vodou. Pomocí topných těles, vyhřívaných horkou vodou nebo párou, se tvoří nad vodní hladinou sytá pára. Materiál určený k paření (řezivo, dýhárenské výřezy) je uložen nad vodní hladinou. Paří se při normálním atmosférickém tlaku vzduchu nebo při mírně zvýšeném tlaku prostředí. Zvýšením tlaku se zvyšuje teplota a časy paření se výrazně zkracují. Výsledný čas paření (vaření) je ovlivněn druhem dřeva, rozměry, jeho aktuální vlhkostí a teplotou. Nepřímé paření je mírnější (měkčí) a méně zatěžuje čela pařených elementů, ale trvá déle. V průběhu paření se zpravidla vyrovná vlhkost a teplota dřeva na celém průřezu nebo v potřebném rozsahu (Chuchrjanskij 1953, Dejmal 1995, Trebula 1996, Kamke 2006)

Plasticitu dřeva lze také zvýšit máčením v teplé vodě, případně pomocí „vaření“ v horké vodě. Voda by však neměla vřít, protože by mohlo dojít k následnému poškození vnitřní struktury dřeva. Vaření nebo máčení se uskutečňuje v uzavřených, tepelně izolovaných

vanách nebo bazénech, krytých tepelně izolovaným poklopem, uloženým ve vodním uzávěru. Po vaření dřeva ve vodě je jeho vlhkost poměrně vysoká, což se může následně negativně projevit především nevhodností k lisování a delší dobou sušení. Dosáhnout stavu přechodné plasticity u vlhkého dřeva je možné využije-li se k tomu účelu kontaktní nebo dielektrický ohřev. Radiofrekvenční nebo mikrovlnný ohřev dřeva v tomto případě trvá jen několik sekund nebo minut. Je potřeba dbát na to, aby se během dielektrického ohřevu příliš vlhkost dřeva nesnížila (Torgovnikov 1993, Studhalter, 2009, Merenda 2009).

Paření ve vodní páře nebo vaření dřeva v horké vodě má z pohledu modifikace vlastností v praxi hned několik důvodů (Kafka 1989, Varga 2008, FPL 2010):

- přechodná změna mechanických vlastností (plastifikace),
- změna barvy (barevná egalizace),
- snížení rozdílů ve vlhkosti dřeva na průřezu (vlhkostní egalizace),
- eliminace zbytkových napětí (zlahodnění),
- uvolnění růstových napětí (relaxace),
- zničení nežádoucích zárodků (sterilizace),
- usmrcení parenchymatických buněk (sterilizace),
- úprava dřeva před sušením nebo modifikací.

Kromě již zmíněných příznivých účinků páření a vaření na vlastnosti dřeva se mohou projevit i další účinky. Mezi ty příznivé lze dále zařadit mírné zlepšení obrobiteľnosti dřeva. Pařené masivní dřevo se lépe řeže, soustruží a méně se štípe. Mezi negativními důsledky páření dřeva lze potom v případě některých dřev uvést mírné snížení pevnosti dřeva a poškození trhlinami a deformacemi v důsledku uvolňování růstových napětí. Pokud je doba plastifikace příliš dlouhá, vlivem změkčení ligninu prochází pára snadněji do buněčné stěny. Jejím účinkem nabobtnají pektiny a hemicelulózy. Lignin sice po ochlazení a vysušení dřeva opět ztuhne, avšak hemicelulózy a pektiny zůstanou částečně nabobtnalé, což může mírně snížit původní pevnost dřeva.

V průběhu páření nebo vaření se mohou ze dřeva odstranit některé látky, které jinak zvyšují jeho přirozenou odolnost vůči plísním a houbám (oleje, třísloviny, minerální látky), což však nijak podstatně nelimituje využití této úpravy v praxi.

#### 3.2.1.1 Plastifikace dřeva pářením a vařením

Pomocí páření nebo vaření lze dřevo dočasně plastifikovat. Toto přechodné snížení mechanických vlastností se provádí za účelem přípravy:

- masivního dřeva před lisováním,
- polotovarů k tvarování ohýbáním,
- dýhárenských výřezů pro výrobu dýh.

Před ohýbáním a lisováním dřeva je nutno dosáhnout dočasného snížení pevnosti za účelem zvýšení tlakové deformace. Působením tepla a vlhkosti na hlavní stavební složky dřeva dojde k přechodnému snížení pevnosti - plastifikaci dřeva a k možnosti tvarování dřeva v oblasti plastických deformací. Zvyšováním vlhkosti do meze hygroskopicity a teploty dřeva na 100 až 105 °C se deformace zvětšuje. Optimálně by se vlhkost dřeva před plastifikací měla pohybovat okolo meze hygroskopicity. Vyšší vlhkost prodlužuje dobu sušení. Největší pokles modulu pružnosti u dřeva nastává během prvních 30 minut páření. Jako hlavní příčina bývá označována změna v lignin-sacharidickém podílu dřeva. Po celkovém prohrátí dřevěných polotovarů na požadovanou teplotu se čas plastifikace podle tloušťky a počáteční vlhkosti

masivního polotovaru prodlužuje o 50 až 100 % času ohřevu. Na každých 25 mm tloušťky se doporučuje přibližně jedna hodina ohřevu (Vaněk, 1952, Trebula 1996).

Hydrotermická úprava hranolků před ohýbáním se provádí zpravidla pomocí přímého paření sytou párou v pařících autoklávech (retortách). Paří se přímo párou o tlaku 0,1 až 0,3 MPa. Kondenzát, který při tom může vznikat, obsahuje organické kyseliny, se neutralizuje. Doba vlastního paření se pohybuje od 20 do 180 minut. Při následném ohýbání by povrchová teplota propařeného dílce neměla klesnout pod 80 °C. Dílce u nichž v průběhu skladování vlhkost klesla pod hranici 15 % se doporučuje před vlastním pařením zvlhčit (impregnovat) ve studené vodě v tlakové nádobě při tlaku až 2,5 MPa po dobu asi 120 sekund. U dílců o vlhkosti vyšší jak 45 % by se naopak měla vlhkost dřeva pomocí sušení snížit. V obou případech úpravy vlhkosti je vhodné ponechat materiál nejméně po dobu 24 hodin vyrovnat vlhkost na celém průřezu a teprve potom pařit. Současné působení tepla a vlhkosti má větší vliv na velikost deformace, než když tyto faktory působí samostatně. Přidá-li se k nim ještě vliv chemické látky (amoniak), je změna plastičnosti ještě výraznější (Stojčev 1979, Kafka 1989, Trebula 1996). K ohýbání se u nás používá především dřevo bukové, ale i dřevo jasanové, dubové, jilmové, třešňové, dokonce i borové. Neprané jádro u buku může způsobit při ohýbání problémy. Po mechanické úpravě tvaru nebo objemu, stabilizaci a následném vysušení získává dřevo nazpět řadu původních fyzikálních a mechanických vlastností nebo se k nim poměrně významně blíží. V případě ohýbání dřeva je důležité, že se přechodně zvýší schopnost deformace v tlaku podél vláken, což umožňuje (za použití pásnice na tahem namáhané konvexní straně) ohýbání dřevěných dílců do malých poloměrů. Při ohýbání se může na tlakové konkávní (vnitřní) straně dílce podstatně zvýšit objemová hmotnost modifikovaného dřeva (Chuchrjanský 1953, Vaněk 1952). K přechodné plastifikaci dřeva se nejvíc využívá přímé paření v syté páře. Ohřev ve vodě lze použít tam, kde není na závalu výraznější změna barvy (výroba sudů) nebo v případech, kdy se plastifikuje pouze část dílce určená k ohýbání.

Pomocí hydrotermické úpravy pařením a vařením lze dosáhnout přechodnou změnu fyzikálních a mechanických vlastností dýhárenských výřezů potřebných při výrobě krájených nebo loupaných dých. Plastifikace se uskutečňuje ve speciálních bazénech robustní konstrukce. Je tak usnadněno beztrískové dělení a zvýšení výsledné jakosti dých. Současně se zjednoduší proces odkornování. Výsledkem působení tepla a vlhkosti je také částečné vyrovnání pevnosti dřeva v tlaku v tangenciálním a radiálním směru (pevnostní homogenizace). U tvrdých listnatých dřev je optimálního stavu pro beztrískové dělení (loupaní, krájení) dosaženo při teplotách 80 až 90 °C, u jehličnatých dřev při 60 až 70 °C a u měkkých listnatých dřev při 30 až 50 °C (Král 1999).

### 3.2.1.2 Změna barvy dřeva pomocí hydrotermické úpravy

Změna barvy (odstínu) dřeva v důsledku hydrotermické úpravy pařením je dána tvrdostí (podmínkami) procesu, především teplotou a časem. V případě javorového dřeva je změna odstínu zpravidla nežádoucí. Naopak velmi často může být jedním z důvodů paření změna barvy dřeva bukového dřeva (řezivo nebo dýhárenské výřezy). Dřevo v důsledku propaření dosáhne ekologicky šetrným způsobem bez použití chemických látek rovnoměrného zabarvení a tmavšího odstínu. Zpracovatel ušetří na náročné povrchové úpravě a nemusí používat chemické látky, jako je tomu například při moření.

Barevnou egalizací dřeva je míněno především sjednocení barevného odstínu dřeva na celém průřezu a odstranění přílišných kontrastů. Pařením se například eliminují rozdíly v barvě mezi nepravým jádrem a ostatním dřevem u buku. Barevná egalizace je v tomto případě charakterizována rovnoměrným růžovým, červeným, černohnědým až hnědým zbarvením dřeva. Z našich dřev se nejčastěji za tímto účelem paří dřevo bukové, třešňové, dubové a akátové (Trebula 1996, Riedl 2002). Částečně se mohou pařením eliminovat i některé

viditelnější nežádoucí barevné změny v oblasti suků, zahnědnutí, zapaření, a změny způsobené působením enzymů dřevozbarvujících hub, plísní a bakterií (dub) apod. Barevné změny v důsledku paření jsou způsobeny chemickými reakcemi. Změna barvy (odstínu) dřeva závisí na druhu dřeva. Zejména souvisí s chemickými změnami v oblasti ligninu, s reakcemi produktů degradace polysacharidů a extraktivních látek (oxidace, kondenzace). Termooxidace a hydrolýza dřeva má za následek snížení polymerizačního stupně hemicelulóz a celulózy. Tmavší červenohnědé zbarvení je dáno zejména vznikem chromoforového systému ligninu a oxidací tříslovin. Vzniklé struktury absorbují více světla a vytvářejí tak dojem tmavší barvy. Od 60 do 160 °C dochází k heterolytickým reakcím, při nichž dochází polárnímú štěpení chemické vazby, zpravidla vedoucímu k tvorbě dvou různých částic. Reakce probíhající při teplotách 180 až 260 °C (homolytické) jsou charakteristické štěpením kovalentní vazby na radikály. Tyto vysoké teploty však již zpravidla znamenají porušení kovalentních vazeb a částečné snížení pevnosti dřeva. Intenzita zbarvení a rovnoměrnost vybarvení celého průřezu závisí na druhu, rozměrech a okamžité vlhkosti dřeva, teplotě, tlaku prostředí a délce trvání procesu (Melzer 1989, Halaj 2001, TWA 2003, Klement 2008). Po celkovém prohřátí materiálu na teplotu 90 až 100 °C se začíná postupně projevovat vliv prostředí intenzivnější změnou barvy dřeva. Už po 24 hodinách, kdy je zpravidla dosaženo zásadní barevné změny na celém průřezu, může být proces modifikace odstínu ukončen. K největším barevným změnám dochází právě na počátku procesu paření. Časy paření řeziva se pohybují podle druhu dřeva, tloušťky a počáteční vlhkosti (60 až 70%) od 10 do 40 hodin. Pro barevnou úpravu je nejvhodnější dřevo čerstvě pokácené, protože v tomto případě dojde k sytějšímu a rovnoměrnějšímu zbarvení (Trebula 1995, Riedl 2002). Uvádí se také že, je-li dřevo delší dobu chráněno postřikem nebo uloženo ve vodě v bazénu, bude výsledná barevná změna ještě významnější. Žádaného barevného účinku naopak nebývá dosaženo, pokud se průmyslové paření provádí při teplotě nižší jak 80 °C nebo pokud materiál měl již někdy vlhkost nižší jak 50 %. Paří-li se řezivo o vlhkosti pod mezí hygroscopicity je nebezpečí, že dojde k jeho zešednutí. Dřevo o vlhkosti nižší jak 20 % se pro barevnou úpravu nedoporučuje vůbec. Změna by byla málo výrazná a dřevo by ve většině případů získalo naředlý odstín (Trebula 1989). Paření dřeva je doprovázeno, v důsledku odštěpení acetylových skupin od hemicelulóz, vznikem kyseliny octové a 2-furaldehydu, typickým zápachem.

3.2.1.3 Snížení rozdílů ve vlhkosti dřeva na průřezu a eliminace zbytkových napětí po sušení  
Vlhkostní spád je dán rozdíly ve vlhkosti dřeva na průřezu. Vzniká především při sušení řeziva s konvekčním ohřevem. U vysušeného řeziva je však nežádoucí, protože může být příčinou vzniku vlhkostních napětí. Vlhkostní napětí zanikají po vyrovnání vlhkosti na celém průřezu dřeva.

Zbytkové napětí (zkornatění) vzniká zpravidla v důsledku tvrdších podmínek při sušení dřeva a projevuje se strukturálními změnami (tečením dřeva) v oblasti plastických deformací. Po vyrovnání vlhkosti na průřezu řeziva toto napětí ve dřevě zůstává. Sjednocení vlhkosti jednotlivých kusů vysušeného řeziva (egalizace) a snížení zbytkových napětí po sušení (zlahodnění) spočívá ve zvýšení vlhkosti povrchových vrstev dřeva v důsledku přidání syté páry do sušicího prostoru (ON 49 0651). Provádí se většinou v komorových sušárnách řeziva v průběhu fáze konečného ošetření. V případě zjištění odchylky průměrné konečné vlhkosti od požadované, vlhkostního spádu na průřezu řeziva nebo stavu ustrnutí povrchových vrstev v tahu, je do prostoru sušárny s řezivem přiváděna sytá vodní pára nebo rozstříkována studená nebo teplá voda. Díky tomu následuje zvýšení relativní vlhkosti sušicího prostředí. Po určité době dojde ke zvýšení vlhkosti povrchových vrstev u sušších kusů řeziva a k odstranění vlhkostních rozdílů nebo k eliminaci zbytkových napětí vzniklých v důsledku zkornatění povrchových vrstev dřeva. V současnosti je doporučeno pro určení stavu zkornatění používat zkoušku, při které se zkušební tělísko rozdělí v polovině tloušťky na dvě stejně velké části

(ČSN P ENV 14464 49 646). Podle zjištěné změny tvaru (po klimatizaci) se potom hodnotí stav zkornatění před zlahodněním, či účinnost zlahodnění při hodnocení výsledné kvality usušeného řeziva. Tato zkouška nahradila dlouhodobě používanou „vidličkovou zkoušku“. Pokud se při zkoušce na zkornatění projeví na povrchu dřeva ustrnutí v důsledku tlakového napětí, nelze již konečné ošetření doporučit. Stav, v němž se vysušené dřevo v tomto případě nachází, by se tím pouze zhoršil (Kolman 1951, Trebula 1989, Dejmal 1995, Riehl 2002). Snížení zbytkových napětí lze částečně dosáhnout oscilací parametrů sušení v rámci určitých hodnot, podobně, jako je tomu při přirozeném sušení. V praxi se však z důvodu příliš náročného udržování jednotlivých parametrů tato metoda příliš nevyužívá.

#### 3.2.1.4 Uvolnění růstových napětí

Uvolnění růstových napětí, která vznikají při dělení a diferenciaci buněk dřeva v průběhu růstu stromu, pařením nebo vařením lze aplikovat na celých dýhárenských výřezech pro zvýšení kvality vyráběných dých a eliminaci případných trhlin. Snížení růstových napětí se provádí v pařících jámách nebo varných bazénech nebo komorách pomocí přímého či nepřímého paření. K částečné relaxaci růstových napětí může dojít i v průběhu déle trvajících uložení výřezů nebo kulatiny ve vodě nebo při dlouhodobé ochraně dřeva, uloženého na skladech v hustých neproložených hromadách, postřikovaných vodou (Horský 1987, Trebula 1996, Král 1999).

#### 3.2.1.5 Sterilizace a zvýšení propustnosti dřeva

Preventivní paření lze využít i pro zvýšení propustnosti dřeva, což usnadňuje a zkvalitňuje proces následného sušení nebo impregnace. Sterilizace dřeva jako tepelné ošetření (HT – heat treatment) pařením nebo vařením spočívá v omezení některých nežádoucích biologických procesů, které by mohly ve dřevě probíhat ještě i po skácení stromu. Především se jedná o sterilizaci parenchymatických buněk zvýšenou teplotou. Preventivním pařením čerstvého řeziva lze dosáhnout vyšší propustnosti dřevní struktury a zvýšit tak kvalitu a rychlost sušení (Horský 1987, Trebula 1996).

Teplotami okolo 60 °C (teplota koagulace bílkovin) se ničí zárodky biologických škůdců, které by mohlo dřevo obsahovat. Pro všechny obaly ze dřeva, používané v rámci mezinárodního obchodu, platí mezinárodní směrnice, která uvádí že při tepelném (fyto-sanitárním) opatření musí být dodržen technologický postup, vhodný jak z hlediska teploty, tak z hlediska délky doby úpravy. Při provádění tepelného ošetření dle standardu ISPM 15 musí být dosaženo ve středu dřeva teploty nejméně 56 °C po dobu minimálně 30 minut (FAO 2009). Pro sterilizaci řeziva před expedicí (zejména exportní řezivo) se doporučuje až 12 hodinové paření dřeva při teplotě až 65 °C. Podobným způsobem musí být ošetřeny i dřevěné proklady používané při přepravě. Tepelné ošetření má být prováděno pouze v certifikovaných zařízeních, a musí být doloženo dokladem o průběhu ošetření. (Horský 1987, Reinprecht 1992, Varga 2007). Dřevo je však sterilní pouze v okamžiku ukončení procesu. Postupem času může být ošetřené řezivo znovu napadeno biotickými škůdci.

### 3.2.2 Zařízení pro paření dřeva

V této části je pozornost zaměřena na technologická zařízení typická pro úpravu vlastností řeziva, případně drobnějších sortimentů jako jsou nábytkové hranolky nebo parketové vlisy. Pro úplnost jsou zde okrajově zmíněna i zařízení pro úpravu dýhárenských výřezů před vlastní výrobou loupaných nebo krájených dých, která lze výjimečně pro úpravu řeziva také použít.

### 3.2.2.1 Zařízení pro paření řeziva a parketových vlysů

Pro paření řeziva a parketových nebo podlahových vlysů se většinou používají pařicí zvony a komory. Jedná se zpravidla o nadzemní tepelně izolovaná zařízení v nerezovém provedení. Převažuje přímé paření pomocí syté páry přiváděné přímo do pracovního prostoru.

Pařicí komory jsou stabilní zařízení využívající teplo a vodní páru pro trvalou úpravu chemických, fyzikálních, mechanických a technologických vlastností dřeva jako je barva, odstín, sterilita, rozměrová stabilita či opracovatelnost. Standardní kapacita současných pařicích komor činí přibližně 30 m<sup>3</sup>. Komory pro paření řeziva mají tepelně izolovaný plášť a vrata. Vybaveny mohou být přímým nebo nepřímým pařením. Součástí menších samonosných komor je i kvalitní tepelně izolovaná podlaha.

Pařicí zvony pro paření řeziva jsou lehké tepelně izolované konstrukce kruhového půdorysu bez dna. Pomocí jeřábu se umísťují na zpevněnou betonovou plochu opatřenou vodním uzávěrem a přívodem topného média. Místo kruhového půdorysu může být použita i konstrukce čtvercového nebo obdélníkového půdorysu bez dna. Spodní lem stěny zvonu dosedá do vodního uzávěru (Vaněk 1952, Chuchrjanskij 1953, Hoský 1987, Kafka 1989, Dejmal 1995).

### 3.2.2.2 Zařízení pro hydrotermickou úpravu dýhárenských výřezů

Pro hydrotermickou úpravu výřezů pro výrobu dýh se používají především pařicí jámy a varné bazény. Jedná se o tepelně izolované konstrukce vyrobené převážně z antikorozních materiálů. Odnímatelné víko v antikoročním provedení je uloženo ve vodním uzávěru. Nepřímé paření se v tomto případě úpravy využívá častěji než paření přímé nebo vaření. Při nepřímém paření je do spodní části nádrže napuštěna voda, která je přímo ohřívána topením umístěným na dně nádrže. Dýhárenské výřezy určené k paření jsou uloženy na masivním roštu nad vodní hladinou. Vaření výřezů ve vodě ve velkých kádích nebo bazénech se doporučuje při plastifikaci cenných sortimentů s nižší vlhkostí. Materiál je v tomto případě uložen přímo ve vodě. Průměrná vlhkost dřeva z listnatých stromů před zahájením procesu paření za účelem přechodné plastifikace dýhárenských výřezů by měla minimálně odpovídat průměrné vlhkosti čerstvě pokáceného stromu, což může být od 60 do 120 %. Pro tvrdé listnaté sortimenty se doporučují teploty od 80 do 90 °C, pro výřezy z jehličnatého dřeva 60 až 70 °C a pro měkká listnatá dřeva 30 až 50 °C. Výřezy z některých měkkých listnáčů lze v letním období loupat bez ohřevu. Do doby vlastní tepelné úpravy se nepočítá doba ohřevu. U zmrzlého dřeva se doba ohřevu prodlužuje o dobu potřebnou na rozmrazení zmrzlého dřeva (Horský 1987, Trebula 1989, Král 1999).

### 3.2.2.3 Zařízení pro plastifikaci dílců před ohýbáním (lisováním)

K plastifikaci dílců před ohýbáním (lisováním) se využívají malokapacitní masivní zpravidla litinové tepelně izolované hermetické autoklávy (retorty) čtvercového, obdélníkového nebo kruhového průřezu, které mohou být samostatné nebo uspořádané po několika kusech vedle sebe (baterie). Aby se dílce určené k paření nedotýkaly konstrukce autoklávy, jsou uloženy v kovových koších, umístěných uvnitř zařízení. Kromě měřicích, regulačních přístrojů a bezpečnostních prvků spojených s uzavíráním a otevíráním zařízení, obsahuje autokláv zpravidla přívod páry, přívod vlhčící vody a odvod kondenzátu. Po zahájení paření (ohřevu) je rozdíl mezi teplotou povrchu dřeva a parou nejvyšší. Pára se po předání tepla ochlazuje a kondenzuje na povrchu ohřívané plochy. Do vyrovnání teplot se intenzita kondenzace snižuje. V případě, že je zahříváné dřevo sušší, přijímá vodu zkondenzovanou na svém povrchu, což snižuje případná napětí na průřezu dřeva. Pára by měla být sytá. Dosáhne-li dřevo při paření na celém průřezu požadované teploty a vlhkosti, která odpovídá vlhkosti a teplotě syté páry, je dřevo připraveno k dalšímu zpracování (Trebula 1989). Další prodlužování procesu přestává být hospodárné. Zařízení pracují zpravidla při teplotě okolo 102 až 105 °C a tlaku do

500 kPa. Podle potřeby může být autokláv konstruován jako průchozí se dvěma víky nebo neprůchozí s víkem jedním. Vzhledem k časté výměně materiálu spojené s otevíráním víka je u zařízení tohoto typu poměrně velká spotřeba tepelné energie (Vaněk 1952, Riedl 2002, Trávník 2005).

### 3.3 Mikrovlnná modifikace dřeva

Úprava dřeva pomocí mikrovlnného záření se řadí mezi modifikace v elektromagnetickém poli. Mikrovlnné záření může být kromě sušení, plastifikace a sterilizace využito i ke zvýšení propustnosti dřeva z důvodu zlepšení příjmu impregnační látky. Uvádí se, že působení mikrovln o frekvenci 2,45 nebo 0,922 GHz může způsobit částečnou destrukci neprůchodných ztenčení buněčných stěn a dřevných paprsků (Torgovnikov 1993, Torgovnikov 1995, Torgovnikov 1999, Li 2005). Protože dřevné paprsky neplní ve dřevě mechanickou funkci, nesníží tato úprava významně pevnost dřeva, ale zvýší se propustnost pro kapalinu, zejména v příčném směru.

Mikrovlnná modifikace dřeva je založena na podobných základech, jako bylo uplatnění mikrovln při sušení řeziva. Také v tomto případě dochází v důsledku působení mikrovlnného záření k otáčení molekul polarizovatelných látek a ke vzniku tepla. Pouze se mění parametry procesu. Vzniklé páry a jejich tlak potom mohou mít za následek řízené poškození mechanicky nejméně odolných stavebních elementů a míst ve struktuře dřeva, což jsou především ztenčení v buněčných stěnách a parenchymatické buňky dřevných paprsků a thyl. Kromě úpravy dřeva před vlastním sušením lze tedy mikrovlnnou úpravu využít pro zvýšení propustnosti dřeva před impregnací ochrannými prostředky a při výrobě nových materiálů na bázi dřeva. Mikrovlnnou technologii je možno dokonce použít i při rozvláknování dřeva (Torgovnikov 1997, Torgovnikov, 2009).

Metoda využití mikrovlnného záření při modifikaci dřeva za účelem zvýšení jeho propustnosti je patentována jak pro urychlení a zkvalitnění sušení dřeva, tak jako příprava dřeva před impregnací (Torgovnikov 2000). Zvýšení propustnosti dřeva může být dosaženo ve všech anatomických směrech. Původně byl tento postup úpravy vyvinut pro zlepšení propustnosti eukalyptového dřeva z důvodu zabránění vzniku kolapsu při klasickém teplovzdušném sušení. Mikrovlnnou úpravou může být zvýšena propustnost špatně propustných dřev nebo jejich částí před vlastní impregnací chemickými ochrannými prostředky, pryskyřicemi nebo jinými chemikáliemi upravujícími vlastnosti dřeva. Z našich dřev se to může týkat například špatně propustného smrkového dřeva, ale i jádrových dřev (dub, jasan) nebo dřev s nepravým jádrem (buk). Experimenty na dřevě modřinu (Hong-Hai 2005, Reinprecht 2010, Dömény 2013) ukázaly, že se příjem impregnační látky po mikrovlnné úpravě významně zvýšil, aniž by došlo k podstatnému snížení pevnosti modifikovaného dřeva. Další experimenty (Torgovnikov 2003) potvrdily, že dřevo modifikované mikrovlnným zářením o frekvenci 0,922 nebo 2,45 GHz a výkonu 250 až 1 200 MJ·m<sup>-3</sup> mělo významně zvýšenou propustnost pro tekutiny. Výsledky dokazují, že tato technologie může být v případě potřeby aplikována na všechny druhy dřev. Pro modifikaci dřeva sloupů a trámů bylo laboratorně vyzkoušeno 60 kW zařízení se zdrojem pracujícím na frekvenci 2,45 GHz nebo 0,922 GHz. U frekvence 2,45 GHz je uváděna spotřeba energie je od 13 000 do 135 000 kW·m<sup>-3</sup>. V případě frekvence 0,92 GHz se uvádí spotřeba energie od 5 000 do 25 000 kW·m<sup>-3</sup>.

Pro praxi bylo navrženo mikrovlnné zařízení o výkonu 400 kW, které je schopno před impregnací upravit borové železniční pražce i telegrafní sloupy většího objemu. V souvislosti se zvýšením propustnosti dřeva byl vyvinut a ověřen postup při němž je řezivo mikrovlnně upraveno, následně napuštěno pryskyřicí a v tomto stavu před konečným vysušením a vytvrzením pryskyřice ještě slisováno (Vinden 2011). Výsledný produkt (Vintorg) má velmi dobré mechanické vlastnosti.

Mikrovlnný systém pro úpravu vlastností dřeva obvykle zahrnuje generátory s tunery a konkrétní mikrovlnné aplikátory. Dopravní systém podává pomocí posuvného mechanismu dřevo k aplikátoru regulovatelnou rychlostí. Odvětrávací systém odstraňuje výpary, vodu a prachové částice z aplikátoru a zabraňuje kondenzaci vody na vnitřním povrchu aplikátoru. Kontrolní a monitorovací systém umožňuje kvalitní modifikaci dřeva (Zhao 1998, Torgovnikov 2000). V našich podmínkách je v průmyslu prozatím povoleno pracovat s frekvencí 2,45 nebo 0,922 GHz.

### **3.3.1 Torgvin**

Zatím zřejmě největšího pokroku v oblasti modifikace dřeva pomocí mikrovlnného záření bylo dosaženo v Austrálii. Při postupu Torgvin se používá především eukalyptové řezivo s obsahem vlhkosti nad mezí hygroskopicity. Řezivo je potom v uzavřeném prostoru vystaveno působení mikrovlnného záření. Vysoká intenzita mikrovln způsobuje změny ve struktuře dřeva. Mikrovlnná energie je ve dřevě přeměněna na teplo a vznikající pára vytváří tlak v dřevních buňkách. Jako první dochází k porušení buněk dřevných paprsků, které mají v porovnání s hlavními strukturálními pletivy dřeva (tracheidy, libriformní vlákna, tracheje) nejtenčí stěny.

Pod vysokým vnitřním tlakem par se tenkostěnné buňky dřevných paprsků roztrhnou za vytvoření mikrotrhlin. Tyto mikrotrhliny vytváří cesty pro snadnější prostup tekutin v příčném směru. Změnou výkonu magnetronu je možno řídit množství mikrotrhlin, jejich rozměry a distribuci. V závislosti na použitém typu a výkonu zdroje a druhu dřeva se po úpravě zvětší objem materiálu o 9 až 15 %. Sníží se objemová hmotnost modifikovaného dřeva. Dojde tak i ke změně zvukově izolačních vlastností. Zvýšení propustnosti dřeva v radiálním i podélném směru může být dále využito jako úprava dřeva před sušením nebo pro výrobu kompozitních materiálů (Torgovnikov 2000, Studhalter 2008).

Pomocí mikrovln může být dosažen různý stupeň modifikace dřeva. Nízký stupeň je charakterizován zvýšením propustnosti dřeva v rozmezí 1,1 až 1,5 násobku původní hodnoty. Intenzita záření není tak silná, aby významně pozměnila ostatní fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu. Tento stupeň je charakterizován vznikem trhlinek ve ztenčeninách, roztavením pryskyřice a jejím přesunem v pryskyřičných kanálcích a občasným poškozením parenchymatických buněk. Mírný (střední) stupeň modifikace může zvýšit propustnost dřeva až na tisícinásobek původní hodnoty. Je charakterizován vznikem trhlin ve ztenčeninách, varem pryskyřice, rozbitím thyl a potrháním stěn většiny dřevných paprsků. Vysoký stupeň modifikace je potom charakterizován přetvořením dřeva ve vysoce porézní materiál, s velkým počtem dutin jak v podélném, tak v příčném směru, vhodný k impregnaci. Je charakterizován varem a odpařením pryskyřice, potrháním dřevných paprsků a především poškozením buněčných stěn všech hlavních stavebních elementů dřeva. Extrémním případem je využití této technologie pro rozvláknování dřeva především pro výrobu papíru a celulózy (Torgovnikov 2000).

### **3.3.2 Vintorg**

Dřevo modifikované technologií Torgvin může být v další fázi impregnováno pomocí syntetické pryskyřice. Ta proniká přes kanálky vytvořené mikrotrhlinami hluboko do struktury záměrně narušeného polotovaru. Po impregnaci močovino-formaldehydovou nebo isokyanátovou pryskyřicí je dřevo předlisováno a zbaveno přebytečné pryskyřice. Následuje vlastní slisování a vytvrzování pryskyřice ve vyhřívaném lisu. Po ochlazení je polotovar rozřezán na dílce hrubých rozměrů. Výsledkem je kompozitní materiál tvořený dřevem a pryskyřicí - Vintorg. Tento produkt má mechanické vlastnosti, podobné překližovanému materiálu. To vše při zvýšení trvanlivosti a rozměrové stability. Současně si zachovává podobný vzhled jako neošetřené řezivo. Tento proces je doporučen pro většinu dřev. Zvláště



výhodný je pro dřeva s nižší objemovou hmotností jako je douglaska, borovice, případně eukalypt. Technologie Vintorg umožňuje použití dřev s nízkou přirozenou odolností do prostředí, kde jsou požadavky na odolnost dřeva vysoké. Jedná se především o uplatnění v exteriéru, kde dřevo přichází do styku s vysokou vlhkostí, dřevokaznými houbami nebo dřevokazným hmyzem (Torgovnikov 2000, Vinden 2011).

### **3.4 Plazmatická modifikace dřeva**

Uplatnění plazmatu k řezání a svařování kovů (horké plazma) nebo k úpravě vlastností povrchu různých nedřevěných materiálů (studené plazma) jsou již dostatečně známé. Modifikace povrchu dřeva a materiálů na bázi dřeva studeným plazmatem o teplotě 25 až 50 °C je zajímavou alternativou úpravy vlastností dřeva (modifikace) ve fyzikálním poli. Stále častěji jsou publikovány práce věnující se oblasti modifikace vlastností dřeva plazmou a i v současnosti se ověřuje použití plazmy pro různé technologické procesy zpracování dřeva (Gräfe 1989, Podgorski 2000, Bente 2004, Charles 2004).

Ve fyzice je plazma charakterizováno jako tzv. čtvrté skupenství hmoty, do něhož se látka dostane při velmi vysokých teplotách. Plynná fáze plazmy je elektricky neutrální směsí elektronů, iontů, radikálů, fotonů, rekombinovaných produktů a neutrálů, navozených pomocí vnějšího zdroje energie o vysoké frekvenci. Molekuly jsou rozbity na atomy a elektrony jsou v atomech tak silně excitovány, že se pohybují volně bez vazby na konkrétní atom. Plazma nemusí být pouze zdrojem extrémně vysokých teplot, nutných k dělení nerostných látek. Při nastavení specifického výkonu generátoru elektrické energie lze při výrobě plazmy upravovat povrchy látek rostlinného původu při nízké teplotě, bez jejich poškození. Tyto procesy mohou způsobit změnu počtu volných hydroxylových skupin na povrchu materiálů. To se projevuje změnou kontaktního úhlu (úhlu smáčení). Bylo zjištěno, že studené plazma účinkuje pouze v povrchových vrstvách do hloubky několika nanometrů. Jedná se tedy spíše o povrchovou modifikaci dřeva. Mechanické vlastnosti upravených materiálů se proto při působení studeného plazmatu prakticky nemění. Uvádí se, že tato forma modifikace může postupem času ztrácet na intenzitě. Účinky modifikace dřeva plazmatem s časem výrazně klesají, proto ji lze charakterizovat spíše jako úpravu přechodnou. Modifikace dřeva plazmatem se provádí za účelem zvýšení hydrofilicity nebo hydrofobity. Tato úprava je perspektivní v oblasti zvýšení odolnosti a kvality povrchové úpravy a lepení dřeva (Klíma 2000, Slaviček 2005). Ve směsi s jinými látkami může být plazma využito jako nosič k tvorbě velmi tenké vrstvy (nanovrstvy) určité látky na povrch dřeva. Pokud je povrch dřeva upraven pouze samotným plazmatem je potřebné z důvodu časově omezené trvanlivosti úpravy urychleně nanést lepidlo, nátěrovou hmotu nebo jinou látku.

Modifikace povrchu dřeva plazmatem se provádí na zařízení, které se skládá z vysokonapěťového zdroje a elektrod dielektrického bariérového výboje v ochranné plynné atmosféře kyslíku, dusíku, oxidu uhličitého, amoniaku nebo argonu (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> a Ar). Plazma může být na povrch aplikováno buď pomocí speciálních vysokofrekvenčních vysokotlakých dutých katod - plazmových trysek (Klíma 2005) nebo plošného aplikátoru s vodivými elektrodami, které jsou upevněny na ploše keramické desky v jedné rovině (Šimor 2002). Plazmové trysky lze použít pro rovné i tvarované povrchy, plošné zařízení je vhodné pro úpravu rovných ploch.

Při výrobě plazmatu vzniká ozón, který je nutno z pracovního prostoru odsávat. Pro požadovaný výsledek je rozhodující typ a tlak použitého plynu, výkon vysokofrekvenčního generátoru elektrického proudu (frekvence 13,56 MHz, výkon 0 až 300 W nebo 0 až 800 W), vzdálenost od upravovaného povrchu a délka působení (sekundy až minuty). Plazmy samotné nebo ve směsi s jinou látkou (hexametyldisiloxan – HMDSO) může být využito především k úpravě povrchu dřeva před nanášením lepidel a nátěrových hmot z důvodu změny kontaktního úhlu. Pomocí této metody lze zvýšit či snížit přilnavost a tím vlastně regulovat

spotřebu lepidel a laků, či ovlivňovat kvalitu spoje mezi lepidlem nebo lakem a povrchem dřeva.

### 3.5 Lisování dřeva

Nedostatek kvalitního tvrdého dřeva s dobrými mechanickými vlastnostmi a vysokou estetickou hodnotou vedl k vývoji několika způsobů mechanické modifikace masivního dřeva za účelem získání nových materiálů s vysokou kvalitou. Pomocí lisování (komprimace) lze dosáhnout významnou změnu mechanických i fyzikálních vlastností dřeva a zvýšit tak možnosti uplatnění některých tuzemských dřev. Je všeobecně známé, že s růstem objemové hmotnosti roste pevnost dřeva. Relativně nízká objemová hmotnost dřeva je dána jeho anatomickou stavbou a pórovitou strukturou. Chceme-li objemovou hmotnost dřeva podstatně zvýšit, musíme jeho vnitřní strukturu změnit. Jednou z možností jak toho dosáhnout je dřevo pomocí vnějšího tlaku mechanicky slisovat. Dřevo by při komprimaci nemělo obsahovat vodu volnou. Při lisování by mělo být dřevo přechodně tvárné (plastifikované). Tvárnosti je nejčastěji dosaženo pomocí tepla a určité vlhkosti, případně pomocí chemické látky. Změna tvaru by měla proběhnout bez porušení materiálu. Při vlhkosti 25 až 30 %, teplotě od 60 do 150 °C a lisovacím tlaku 10 až 15 MPa lze přechodně plastifikované dřevo komprimovat. Maximální stupeň slisování je závislý na objemu pórů. Plastifikované dřevo se ve směru kolmém na dřevní vlákna poměrně snadno slisuje přibližně až na poloviční objem (Kollmann 1951, Seborg 1956, Solár 1997, Haller 2004, Skyba 2009). Pro rovnoměrné lisování se doporučuje rychlost od 1 do 5 mm za minutu. Po stabilizaci, ochlazení a vysušení tak vznikne nový materiál - zhuštěné dřevo. Především se jedná o zvýšení objemové hmotnosti, což má zpravidla za následek zvýšení tlakové pevnosti a tvrdosti dřeva. Hustota některých našich dřev o střední objemové hmotnosti se díky slisování může zvýšit až na 1 400 kg.m<sup>-3</sup>. Dřevo jako materiál se vlivem působení vnější síly chová částečně pružně a částečně plasticky. Pod vznikajícím napětím dřevo v oblasti plastických deformací „teče“ – lisuje se. Plastické vlastnosti lze ovlivnit změnou vlhkosti a teploty dřeva. Ke zvýšení plasticity před lisováním lze použít i chemické látky.

Výsledkem zvýšení vlhkosti až k mezi hygroskopicity, případně zvýšení teploty do 180 °C nebo využití chemických látek je přechodná změna modulu pružnosti a změna vnitřního tření (viskozity) dřeva. Zmenšuje se vnitřní tření a pružná deformace a zvětšuje se plastická deformace. Společné působení amoniaku, vody a tepla způsobuje ještě výraznější změny v plasticitě dřeva. Amoniak má schopnost snadno pronikat strukturou dřeva; případně se vázat na vodu obsaženou ve dřevě. Kromě přechodné plastifikace dochází v důsledku chemických reakcí (především s tříslovinami, taniny a ligninem) k trvalému ztmavnutí odstínu dřeva. Příliš dlouhé působení amoniaku může trvale zhoršit mechanické vlastnosti dřeva (Nečesaný 1972, Stojčev 1979, Weigl 2007).

V malém rozsahu lze slisovat i dřevo vysušené bez předchozí plastifikace. Možnost komprimace dřeva se zvyšuje s nárůstem vlhkosti až po mez hygroskopicity. Každému podstatnějšímu zhuštění dřeva by však mělo předcházet přechodné zvýšení jeho plasticity. Jako optimální podmínky pro přechodnou plastifikaci se uvádí vlhkost dřeva okolo meze hygroskopicity a teplota dřeva od 95 do 105 °C. Dřevo se zpravidla ohřívá ve vodní páře nebo vaří ve vodě. Jak už bylo uvedeno existují i chemické plastifikátory jako například amoniak. Po procesu přechodné plastifikace, komprimace, stabilizace tvaru, snížení vlhkosti a teploty a po aklimatizaci, lze materiál dále technologicky zpracovávat (Chuchrjanskýj 1953, FPL 1999, Haller 2004, Navi 2012). Nové výzkumy poukazují i na možnost uplatnění vyšších teplot 170 až 200 °C (VTC - Viscoelastic Thermal Compression). Vysoká teplota pářeného dřeva současně přispívá ke snížení rovnovážné vlhkosti slisovaného dřeva a tím ke zvýšení jeho rozměrové stability (Kamke 2006, Kutnar 2008).

U většiny postupů, při nichž má být dosaženo větší pevnosti a tvrdosti dřeva, působí lisovací síla ve směru kolmém na dřevní vlákna. Stupeň slisování závisí na objemové hmotnosti a plasticitě dřeva. Také objem pórů (pórovitost) a jejich struktura může být měřítkem jak moc lze daný druh dřeva zkomprimovat. Z hlediska zachování pevnosti je velmi důležité, aby u dřevních buněk nedošlo k poškození buněčných stěn. Jedná se tak pouze o zmenšení objemu lumenů buněk. Stlačitelnost dřeva se zvětšuje se zvyšováním vlhkosti až do meze hygroscopicity. Obsahuje-li dřevo vodu volnou, kvalita komprimace dřeva se podstatně zhoršuje. Obdobný vliv mají na kvalitu lisování teploty od 0 do 180 °C. Čím je teplota komprimovaného dřeva vyšší, tím větší je plasticita dřeva. Dlouhodobější držení teploty nad hranicí 130 °C už ale může významněji zvýšit křehkost modifikovaného dřeva. Rychlost ohřevu a šíření teploty závisí především na vlhkosti dřeva a na způsobu ohřevu. Čím vlhčí je dřevo, tím snadněji se ohřívá. V případě konvekčního a kontaktního ohřevu dochází ke zvyšování teploty od povrchových vrstev směrem do středu. Ohřev v syté páře je poměrně šetrný a může zvýšit vlhkost dřeva. Při dielektrickém ohřevu (mikrovlnný, radiofrekvenční) je materiál zpravidla prohříván v celém objemu současně. Ohřev v tomto případě probíhá podstatně rychleji (minuty). Problémem mikrovlnného ohřevu může být různá účinnost, která může být způsobena nerovnoměrným účinkem mikrovln, nerovnoměrně rozloženou vlhkostí a hustotou dřeva. Jistým problémem může být i nežádoucí intenzivní snižování vlhkosti dřeva ihned po zahřátí. Vliv mikrovln klesá se vzdáleností modifikovaného materiálu od zdroje nebo se mění v důsledku nerovnoměrně rozložené vlhkosti na průřezu dřeva (Torgovnikov 2000). V oblasti plastických deformací dochází při komprimaci k trvalé (nevratné) deformaci dřeva. Vzhledem k tomu, že teplé a vlhké dřevo má i po slisování určitou tendenci částečně se vrátit do původního tvaru (oblast viskoelastických deformací), je vhodné ještě před sušením a ochlazením stabilizovat materiál ve slisovaném stavu. Stlačitelnost dřeva je tím větší, čím vyšší je jeho vlhkost (do MH) a teplota a čím nižší je hustota dřeva. Zvýšením tlaku páry nebo prodloužením času paření se trvalá deformace dřeva zvyšuje. Pokud se však optimální podmínky překročí, velikost deformace klesá. Po vysušení a ochlazení se deformace mění na trvalou (Chuchrjanský 1953).

Jsou známé postupy, kdy je dřevo ve směru kolmém na dřevní vlákna slisováno až o 60 % z původního rozměru. To je ale hodnota spíše výjimečná. Nejčastěji se lisuje o 30, 40 až 50 % z původního rozměru. Významnou roli při lisování dřeva hraje charakteristická stavba a chemické složení jednotlivých dřev. Na kvalitu a stupeň slisování má vliv velikost, tvar a počet jednotlivých stavebních elementů. Nejmenší stlačitelnost dřeva je v podélném směru, největší ve směru radiálním (Matovič 1993). Pro zhušťování jsou vhodná především dřeva s rovnoměrnou strukturou. Z našich dřev jsou to dřeva roztroušeně pórovitá (buk, topol). Lisovat však lze všechna dřeva, dokonce i dřeva jehličnatá (Haller 2004, Merenda 2010). U dřev kruhovitě pórovitých a dřev jehličnatých se lisováním v radiálním směru dosáhne rovnoměrnějšího rozložení objemové hmotnosti v rámci jednotlivých letokruhů (Nairn, 2005, Kamke 2006).

Určitou nevýhodou slisovaného dřeva je, že pokud se zvýší vlhkost v okolí, má takto modifikované dřevo tendenci více bobtnat a vracet se tak částečně do stavu před slisováním (Seborg 1962, Boonstra 2007)). Tomu se dá u komprimovaného dřeva předejít snížením počtu volných sorpčních míst pomocí následné úpravy vysokými teplotami (130 až 200 °C) (Staypak, Lignamon,) nebo impregnací různými hydrofobními nebo zpevňujícími látkami (Accoya, Vintorg) (Rowell 1999).

S ohledem na směr lisovacího tlaku lze rozlišit lisování:

- ve směru kolmém na dřevní vlákna,
- ve všech směrech (izostaticky),
- ve směru rovnoběžném s dřevními vlákny.

Pokud je zhuštění dřeva rovnoměrné na celém průřezu, lze stupeň slisování poměrně jednoduše stanovit z rozdílu objemové hmotnosti dřeva před a po zhuštění. V případě nerovnoměrného zhuštění dřeva se používají ke zjištění hustotního profilu náročnější experimentální metody, založené např. na využití roentgenového záření nebo magnetické rezonance (Blomberg 2006, Dejmal 2009, Kúdela 2013).

### **3.5.1 Lisování dřeva plastifikovaného ve vodní páře ve směru kolmém na dřevní vlákna**

Nejjednodušším případem zhušťování plastifikovaného dřeva je lisování jednoosé. Lisovací síla v tomto případě působí pouze v jednom směru. Materiál je pomocí pohyblivé lisovací desky utlačen směrem k pevné podložce. Aby proces lisování probíhal co nejúčinněji měly by být všechny části lisovacího zařízení, které přijdou do kontaktu se dřevem vyhřívány, aby nedošlo k nežádoucímu snížení plasticity v průběhu vlastního lisování vlivem poklesu teploty dřeva (Kamke 2006, Kutnar 2008).

S ohledem na produktivitu práce se používá vstupní materiál o nižší vlhkosti a uplatňuje se vyšší lisovací tlak. Použije-li se dřevo o vyšší vlhkosti, je možné použít nižší lisovací tlaky, ale prodlouží se tím významně doba sušení. Při lisování dřeva s vlhkostí okolo 10 až 15 % se používají lisovací tlaky až 30 MPa. Při komprimaci dřeva v lisech se plastifikovaný materiál ukládá těsně vedle sebe do vyhříváního lisu, aby při lisování nedocházelo k vybočování dřevních vláken. Při rovnoměrném zhušťování plastifikovaných hranolků o teplotě 80 °C může lisovací cyklus trvat okolo dvou hodin. Před vyjmutím z lisu je nutné materiál zchladit, aby nedošlo k jeho poškození vyvezením do chladnějšího prostředí (Kafka 1989).

Podle stupně slisování rozlišujeme lisování rovnoměrné a nerovnoměrné. V případě rovnoměrného plošného lisování je rozměr plastifikovaného dřeva ve směru slisování stejný po celé ploše lisovací desky. Aby bylo dřevo rovnoměrně zhuštěno v celém průřezu, pohybují se lisovací desky v tomto případě zpravidla velmi pomalu – o několik milimetrů za minutu (harmonikový efekt). Nerovnoměrným lisováním v jedné rovině dosáhneme toho, že míra zhuštění dřeva ve směru pohybu lisovací desky bude nestejná. Plastifikované dřevo je v tomto případě lisováno buď pomocí tvarované lisovací desky nebo je před komprimací pomocí rovné lisovací desky obroben (reliéfován) povrch dřeva.

V případě, že lisovací síla působí na těleso jak v radiálním směru, tak ve směru tangenciálním, hovoří se o lisování dvouosém. Speciálním případem zhušťování dřeva je válcování. Lisovací sílu vytvářejí dva otočné přítlačné válce, mezi kterými je dřevo stlačováno. Tento způsob komprimace je vhodný pro úpravu objemové hmotnosti různých tvarovaných lamel a lišt.

Způsob, kdy hydrostatický lisovací tlak působí z více směrů je označován jako lisování semiizostatické (Calignum). Pro lisování dřeva se používá tlak překračující mez pevnosti dřeva. Stupeň slisování závisí v tomto případě na druhu dřeva a jeho anatomické stavbě a není stejný ve všech anatomických směrech (Linde 1997, Blomberg 2006).

Dřevo zhuštěné ve směru kolmém na dřevní vlákna a dřevo částečně izostaticky lisované má zvýšenou objemovou hmotnost, vyšší pevnost a tvrdost. Velmi dobře se obrábí a soustruží. Jistou nevýhodou slisovaného dřeva oproti dřevu nelisovanému je, že v důsledku změny rovnovážné vlhkosti vykazuje výrazně větší rozměrové změny.

K většímu zhutnění povrchových vrstev lisovaného plastifikovaného dřeva může dojít při vyšší rychlosti lisování. Tento způsob lisování (utlačení) povrchových vrstev může být v některých případech žádoucí (spoje, náslapné vrstvy). Při nižších lisovacích rychlostech se naopak dosáhne rovnoměrnějšího zhuštění na celém průřezu materiálu – harmonikový efekt (Král 1999). Tvrdost a pevnost takto upraveného dřeva je velmi vysoká. Při působení tlaku kolmo na dřevní vlákna může dojít při lisování k vybočení dřevních vláken do stran.

Vybočení do stran může být tím větší, čím menší je poloměr letokruhů a čím větší je šířka jarní části letokruhu; vliv má i vrstevnatost dřevového paprsku. U dřev listnatých roztroušeně pórovitých a dubu a dřev jehličnatých je v případě lisování v tangenciálním směru vybočení menší. Vysvětluje se to protažením cév v radiálním směru (Chuchrjanskyj, 1953). Zkoušky prokázaly proporcionální zvýšení tuhosti a pevnosti s nárůstem objemové hmotnosti. Výsledný materiál je poněkud křehčí, což dokumentuje snížení přerážecí práce a ohybové pevnosti, naopak tvrdost se významně zvýší. V důsledku zvýšení objemové hmotnosti slisovaného dřeva reaguje materiál citlivěji na změny vlhkosti prostředí, což se projevuje většími změnami vnějších rozměrů. Aby se tomu zamezilo, provádí se v některých případech ještě před slisováním impregnace dřeva roztokem látky, která po slisování ve dřevě zpolymerizuje nebo případně částečně sníží jeho rovnovážnou vlhkost (Torgovnikov 2000, Vinden 2007). U slisovaného dřeva lze také za účelem zvýšení rozměrové stability aplikovat modifikaci vysokými teplotami. Tato úprava může ale částečně snížit ohybovou pevnost slisovaného dřeva (Seborg 1956, FPL 1999, Kamke 2011, Dejmal 2013).

Dřevo lisované kolmo na dřevní vlákna je možné použít všude tam, kde je vyžadována zvýšená odolnost materiálu proti opotřebení a mechanické zátěži (nášlapné a tlumicí vrstvy, hudební nástroje, sportovní potřeby, zbraně, soustružené předměty, modely ve slévárenství).

### **3.5.2 Lisování amoniakem plastifikovaného dřeva**

Pokud se masivní vzduchosuché dřevo plastifikuje pomocí amoniaku a následně se zhuští, vysuší a tepelně stabilizuje, jedná se o postup výroby materiálu Lignamon.

V 60. letech 20. století byl v Estonsku prováděn výzkum modifikace především březového a bukového dřeva čpavkem. Ve spolupráci s dřevařskými výzkumnými ústavami v Praze a Bratislavě byla u nás v roce 1973 zprovozněna unikátní pilotní poloproduční linka na výrobu amoniakem modifikovaného dřeva. Při této úpravě se k běžnému způsobu plastifikace dřeva hydrotermickou úpravou připojuje i změna vlastností dřeva amoniakem. Dřevo o vyšší vlhkosti se zahřívá a chemicky se plastifikuje čpavkovými parami. Amoniak proniká nejen do amorfní části vláken buněčné stěny, ale i do vazeb ligninu (EP 0197674 A1). Potom se slisuje, zbaví přebytečného dusíku, tvarově stabilizuje při teplotě okolo 130 až 180 °C a suší se. Po vysušení, ochlazení a odstarnění amoniaku se vytvoří vazby nové. Dřevo se stává pevné. Konečnou fází procesu je aklimatizace, při které dochází k odstranění části zbylého nezreagovaného čpavku a vyrovnání vlhkosti na požadovanou úroveň.

Objem speciálního svislého autoklávu se zabudovaným lisovacím zařízením je 3,5 m<sup>3</sup>. Doporučená počáteční vlhkost hranolků před vlastní úpravou je okolo 18 %. Podle požadované konečné hustoty se lisovací tlak pohybuje od 0,3 do 1,8 MPa. Celková doba operace je v závislosti na vstupním materiálu a požadavcích na výsledný produkt asi 50 hodin. Bočním produktem výroby je čpavková voda, která vzniká kondenzací čpavkových par a roztok amonických fosforečnanů (Stojčev 1979).

Materiál Lignamon má oproti rostlému neupravenému dřevu vyšší objemovou hmotnost, pevnost, tvarovou stabilitu a tmavší hnědou barvu, která zvýrazňuje texturu dřeva. Výsledným produktem jsou zpravidla hranoly modifikovaného bukového dřeva maximální délky 1 500 mm o příčném rozměru, který odpovídá stupni slisování původního hranolku. Plastifikovaný materiál je stlačen zpravidla jednosměrně kolmo na vlákna. Podle požadavku zákazníka přibližně o jednu třetinu až jednu polovinu původního rozměru. Dosažená objemová hmotnost je až 1 300 kg.m<sup>-3</sup> (Stojčev 1979, Kafka 1989).

Lignamon si zachovává většinu žádaných vlastností původního dřeva při zvýšení pevnosti a tvrdosti. Materiál je možno bez problémů obrábět na běžných dřevoobráběcích strojích s použitím nástrojů z tvrdých kovů. Výborně se soustruží, dobře se lepí i povrchově dokončuje.

Pokud je dřevo zhuštěné o 30 % a stabilizované je vhodné pro více namáhané části interiérů, jako jsou zátěžové podlahy do sportovních hal a veřejných prostor, schodiště do veřejných prostor, hmatníky a kobylinky strunných hudebních nástrojů. Uvádí se, že Lignamon - buk Standard plně nahrazuje například dřevo palisandru. Je-li stabilizované dřevo zhuštěné o 50 % je vhodné pro extrémně namáhané součásti strojů (kluzná ložiska zemědělských strojů), pro namáhané části interiérů (zátěžové podlahy do sportovních hal a veřejných prostor, schodiště do veřejných prostor). Výrazně tmavá barva evokuje vlastnosti těžkých tropických dřev. Dřevo je v tomto případě možné obrábět i na kovoobráběcích strojích. Naopak varianta, při níž je stabilizované dřevo zhuštěné jen o 15 % poskytuje materiál, který je snadněji obrobitelný a je vhodný zejména pro truhláře a nábytkářskou či interiérovou výrobu. Kromě uvedených tří kvalitativních skupin lze stupeň slisování (objemovou hmotnost) modifikovaného dřeva volit podle specifické potřeby jednotlivých odběratelů (Stojčev 1979, Kafka 1989, Dejmal 2001, Blažek 2007, Dejmal 2013)

Lze konstatovat, že lisované dřevo Lignamon našlo uplatnění v nábytkářské výrobě (hranolky, okrasné lišty a úchytky), i ve výrobě hudebních nástrojů (varhany, kytary, flétny) a drobnějších suvenýrů. Může sloužit k výrobě parketových vlysů, podlah a nášlapných vrstev. Používá se při výrobě střenek nožů, na pažby pistolí a loveckých zbraní. Vyráběla se z něj modelová zařízení ve slévárenství. V hornictví může být použito jako výdřeva nízkých slojí a ve strojírenství pro kluzná ložiska a kluzné dílce pro prašné prostředí. Přes uvedená pozitiva je otázka výroby lisovaného dřeva u nás nejistá a to především s ohledem na nedostatečný zájem tuzemských odběratelů a možné ekologické dopady výroby.

### **3.5.3 Izostatické (semiizostatické) lisování plastifikovaného dřeva**

Technologie semiizostatického lisování dřeva byla vyvinuta ve Švédsku v roce 1993. Patentována byla v roce 1998 (Castwall). Jedná se o lisování dřeva ve speciálním hydraulickém lisu s pružnou gumovou planžetou, pod kterou se umísťuje dřevo určené k lisování. Před vlastním lisováním je nutné materiál plastifikovat. Během pěti roků byl ve Švédsku ověřen postup průmyslové výroby (Callignum). Zpočátku se touto technologií modifikovalo převážně borové dřevo. Postupující výzkum ukázal, že uvedeným způsobem lze modifikovat prakticky všechna dřeva s nízkou nebo střední objemovou hmotností. Dřevo by před lisováním nemělo obsahovat velké, nezdravé a vypadané suky. V průběhu procesu izostatického lisování se až dvojnásobně zvýší tvrdost. Odolnost proti poškrábání vzrostle až o 200 %. Pevnost v ohybu je vyšší o 30 až 70 %. Změna pevnosti v tahu rovnoběžně s vlákny se u některých dřev mírně zlepšila (borovice) nebo i zhoršila (bříza, javor). S ohledem na poměrně vysokou nehomogenitu slisovaného dřeva bylo prokázáno zvýšení příčného i podélného borcení v souvislosti se změnou vlhkosti dřeva (Blomberg 2006). Dále bylo zjištěno, že modifikované dřevo má v důsledku izostatického slisování zvýšenou propustnost pro tekutiny (trhlínky a uvolněné membrány ve ztenčeninách buněčné stěny). Této skutečnosti bylo využito při impregnaci izostaticky lisovaného dřeva. Zvýšení odolnosti proti vodě bylo u slisovaného dřeva dosaženo impregnací pomocí přírodních olejů - Natural Oil Hardening (NOH). Probarvení na celém průřezu umožnilo přidání pigmentů - All-through Coloring (ATC) (Göthe 2013). S ohledem na poměrně vysokou cenu není v současnosti produkce tohoto materiálu vysoká. Uplatnění by se dalo předpokládat při výrobě vysoce odolných parketových vlysů, dílců pro interiéry automobilů, letadel, lodí, střenek luxusních nožů, golfových holí a hudebních nástrojů.

### **3.5.4 Lisování plastifikovaného dřeva ve směru rovnoběžném s dřevními vlákny**

V tomto případě lisování dřeva má finální materiál zcela specifické vlastnosti. Už v roce 1917 byl patentován modifikační postup, který upravuje rostlé dřevo tak, že i po vysušení zůstává trvale plastické (ohýbací dřevo). Byla vyvinuta speciální strojní zařízení na paření a podélné

lisování dřeva. V roce 1926 byl vydán další patent pro průmyslovou výrobu takto modifikovaného dřeva, který byl uplatněn při výrobě nábytku, oken, vlysů, obrub, hran, schodišťových madel, loketních opěrek, dveřních rámu, ale například i rázu odolných násad na kladiva. Dřevo bylo také úspěšně použito pro stavbu různých leteckých modelů (Biegeholz, Bendywood).

Postup trvalého zvýšení plastičnosti (tvarovatelnosti) dřeva spočívá v tom, že bloky kvalitního dřeva s rovnými vlákny bez suků a vad jsou napřed dokonale propařeny. V tomto stavu jsou vloženy do speciálního lisu, kde je materiál ze stran rozměrově stabilizován tak, aby bylo vyloučeno uhýbání dřevních vláken do stran při vlastním lisování. Následuje komprimace - zhušťování a stlačování dřevních vláken ve směru rovnoběžném s dřevními vlákny. Tento materiál se vyrábí z hydrotermicky upraveného dřeva (buk, dub, javor, jasan, třešeň a ořech) o příčném průřezu 10 × 12 cm a délce až 280 cm. Párou plastifikované dřevo se délkově stlačí asi o 20 % a v takto redukované délce se zafixuje, vysuší a ochladí. Takto slisované dřevo lze následně konvenčně opracovávat a ve studeném stavu ohýbat až do poměru 1 ku 10 (tloušťka dílce k poloměru ohybu). Celý proces paření a komprimace se řídí podle druhu dřeva. V prvním kroku je dřevo plastifikováno sytou parou při zvýšeném tlaku prostředí. Následuje komprese a zafixování ve slisovaném stavu. Poslední fází je sušení na 14% vlhkost a ochlazování (rozměrová stabilizace). Výsledkem je vysušený polotovár, připravený k dalšímu použití. Takto upravený polotovár může být klasicky obráběn, profilován, ohýbán a broušen. Například dílec tloušťky 20 mm může vytvořit rádius až 200 mm. Různě profilované lišty mohou být ve vyhovujících klimatických podmínkách uloženy neomezeně dlouhou dobu bez toho, aby došlo ke změně vlastností získaných během modifikace. Materiál umožňuje tvarování na místě realizace bez dalších zásadních požadavků. Ohyby s velkými poloměry lze tvarovat ručně, menší poloměry jsou tvarovány za pomoci jednoduchých mobilních zařízení, podobných strojům na ohýbání kovových trubek. Pro ohyby složitějších tvarů a dílce většího průměru se doporučuje komprimované dřevo částečně zvlhčit. Čím větší je průměr dílce nebo jeho tloušťka, tím hůž se dřevo tvaruje. Pro některé poloměry a tvary ohybu je vhodné použít pásnici na vnější stranu, podobně jako v případě klasického ohýbání pařeného masivního dřeva. Materiál lze zpracovávat jako rostlé dřevo. Pouze při použití lepidel a povrchových úprav je vhodné používat látky, které nejsou ředěné vodou. Na mikroskopických snímcích podélně lisovaného dřeva byly na radiálních řezech zjištěny strukturální změny (mikrotrhliny) na stěnách libriformních vláken (Blažek 2007). V tomto případě lisování dřeva by se dalo také hovořit o jisté formě izostatického lisování.

V oblasti podélně lisovaného dřeva existuje i komplexní technologie, kdy je výroba lisovaného dřeva součástí výrobního procesu pro průmyslovou výrobu ohýbaných dílců z masivního dřeva (Compwood). K plastifikaci dřeva o vlhkosti mezi 20 až 25 % je v tomto případě použita sytá pára nebo vysokofrekvenční ohřev. Podle potřeby je možno dílce plastifikovat pouze místně. Na rozdíl od předešlé technologie není dřevo po 20% slisování zafixováno, ale naopak v oblasti pružných deformací dochází k částečné relaxaci materiálu. Výsledné zkrácení je potom asi jen 3 až 5 % z původní délky. Přesto zůstává i tento materiál trvale obývatelný bez potřeby tradiční hydrotermické úpravy.

Nevýhodou podélně komprimovaného dřeva a výrobků z něho vyrobených může být horší rozměrová stabilita v souvislosti se změnou vlhkosti v okolí. Slisovaný materiál má na rozdíl od nemodifikovaného dřeva tendenci více bobtnat. V tomto případě nelze při zabudování do interiéru zanedbat ani rozměrovou změnu v podélném směru. Pro venkovní aplikaci a místa s často se měnící vlhkostí prostředí není tento materiál vhodný. Vzhledem k nižší pevnosti se doporučuje zejména delší dílce vyztužit nebo podložit. Dřevo lisované rovnoběžně s dřevními vlákny umožňuje zajímavé aplikace, zejména z pohledu architektonické tvorby v interiéru.

### 3.6 Modifikace dřeva v oblasti OH skupin

Dřevo se využívá jako stavební materiál, k výrobě nástrojů, předmětů denní potřeby, i při tvorbě uměleckých děl. Z hlediska chemické stavby je dřevo biopolymer tvořený celulosou, hemicelulosami, ligninem a doprovodnými složkami dřeva, což jsou anorganické (především soli vápníku, hořčíku, draslíku aj.) i organické látky (sacharidy, terpenoidy, alkaloidy a další), které je možné ze dřeva extrahovat. Podobně jako řada dalších přírodních materiálů podléhá i dřevo snadno biologickému poškození.

Aby se prodloužila životnost dřeva dochází při modifikaci chemickými látkami k jejich fixování ve struktuře dřeva. Podstata fixace může být buď chemická, nebo fyzikální. V případě chemické vazby látka reaguje přes volné vodíkové můstky s některou složkou dřeva za vzniku stabilního komplexu. Při fyzikální fixaci nejsou látky chemicky navázány na jednotlivé složky dřeva. Po odpaření rozpouštědla zůstávají zafixovány ve struktuře dřeva pomocí méně intenzivních sekundárních vazeb nebo jsou zde drženy pouze mechanicky (Antušková 2014).

V případě modifikace dřeva v oblasti OH skupin se jedná o vybrané způsoby úpravy masivního dřeva provedené na molekulární úrovni, které vedou k požadovaným změnám specifických vlastností dřeva. Rozlišujeme modifikaci aktivní a pasivní. Aktivní forma modifikace dřeva spočívá v chemické reakci stavebních složek buněčné stěny dřeva s chemickou látkou nebo v chemické reakci v rámci hlavních stavebních složek dřeva. Tato forma modifikace dřeva bývá podle současných kritérií, na rozdíl od ochrany dřeva proti biotickému poškození, označována jako chemická modifikace. Vpravení určité látky do dřeva aniž by došlo k chemické reakci mezi touto látkou a dřevem může být potom vnímáno jako modifikace pasivní. Tato látka potom působí ve dřevě vůči vnějším vlivům samostatně. V tomto případě by se však nemělo jednat o látky, které by přímo účinkovaly proti působení hub nebo hmyzu (měď, chrom, arzén), ale o látky které nějakou jinou formou eliminují příjem vlhkosti z okolí. Experimenty ukazují, že absolutní hodnota hystereze sorpce se u dřeva chemicky modifikovaného v oblasti OH skupin ve srovnání s dřevem nemodifikovaným liší jen minimálně (Kumar 1994, Militz 2000, Hill 2006, Teischinger 2008).

Bobtnání dřeva, jako jedné z negativně vnímaných vlastností, lze zabránit určitými úpravami na úrovni buněčné stěny dřeva (Gent 2003). Procesy úpravy dřeva prováděné v rámci buněčné stěny lze charakterizovat jako:

- blokování,
- síťování,
- roubování,
- odbourání.

#### 3.6.1 Blokování

Jednou z možností jak zpevnit dřevo a současně zvýšit rozměrovou stabilitu dřeva je použít synteticky vyrobené nebo přírodní pryskyřice. Jedná se spíše o pasivní formu modifikace dřeva, kdy po vytvrzení pryskyřice je fyzikálně bráněno přístupu vody do pórovité struktury dřeva.

Vlastnosti modifikovaného dřeva jsou ovlivněny jak druhem dřeva, tak typem samotné pryskyřice. Výsledek impregnace závisí na parametrech impregnačního procesu. Významně se zvýší tvrdost, pevnost, hustota i hmotnost dřeva. Impregnací buněčné stěny určitou látkou, zpravidla přírodní nebo syntetickou pryskyřicí, a jejím následným vytvrzením je vytvořena překážka, která brání přístupu molekul vody k volné hydroxylové skupině (blokování).

Zpravidla jsou zaplněny lumeny buněk nebo je impregnována i buněčná stěna. Při vyplnění lumenů znamená 100% hmotnostní přírůstek pryskyřice asi 10 až 20% snížení rozměrových změn. Při vyplnění BS znamená 30% hmotnostní přírůstek pryskyřice až 95% snížení



rozměrových změn (Kamke, 2008). V průběhu impregnace dochází i k plastifikaci dřeva a je tedy možné dřevo ještě před vytvrzením slisovat (Stamm 1951).

Výzkum penetrace BS probíhá i v současnosti, kdy se k impregnaci dřeva kromě syntetických látek stále více využívají látky přírodní. Limitujícími faktory použití syntetických pryskyřic jsou vysoká cena a případná zátěž životního prostředí při výrobě i likvidaci.

Při impregnaci mokrého dřeva lze uplatnit dva postupy. Při nepřímé impregnaci dřeva látkami ve vodě nerozpustnými dochází v první fázi k postupné výměně vody za organické rozpouštědlo, které je schopné mísit se s vodou a postupně ji nahradit (metylalkohol) a ve druhé fázi se rozpouštědlo smíchá s příslušným monomerem (styrén nebo metylmetakrylát). Při přímé impregnaci monomerem rozpustným ve vodě je voda ve dřevě nahrazena přímo například 2 hydroxyetylmethylmetakrylátem. Tento způsob impregnace dřeva je hospodárnější.

### **3.6.2 Sítování**

V důsledku impregnace některými látkami může dojít k tomu, že daná látka vzájemně propojí dvě volná reaktivní místa. Tento proces je označován, jako sítování. Impregnovány jsou pouze buněčné stěny dřeva. Výsledkem je dřevo s nižší rovnovážnou vlhkostí a vyšší pevností. Modifikované dřevo má vysokou odolnost proti zásadám, kyselinám, houbám a hmyzu. Nejčastěji je zmiňována dimethyloldihydroxyethylenmočovina nebo furfurylalkohol.

### **3.6.3 Roubování**

Při tomto procesu dochází k impregnaci dřeva látkami, které nahrazují reaktivní hydroxylovou skupinu skupinou jinou. Tato skupina již nemá schopnost poutat molekuly vody ani reagovat s látkami, které způsobují rozklad dřeva. V důsledku toho se sníží rovnovážná vlhkost dřeva a vzroste odolnost vůči působení biotických faktorů. Impregnovány jsou pouze buněčné stěny dřeva. Materiál je odolný vůči působení slunečních paprsků a na vzduchu tmavne velmi pomalu. Jednou z nejznámějších skupin látek, kterými je dřevo takto upravováno jsou anhydridy, především anhydrid kyseliny octové.

### **3.6.4 Odbourání**

Vlivem působení teplot okolo 200 °C v prostředí inertní atmosféry dochází v průběhu modifikace dřeva k chemickým reakcím, při nichž dochází k depolymerizaci především hemicelulóz. Chemicky reaguje i lignin za vzniku dehtových látek na bázi aromatických uhlovodíků. Zvyšuje se podíl krystalické celulózy. Vzniklé chemické sloučeniny vzájemně reagují. To se projevuje tím, že v závěrečné fázi procesu dochází naopak k růstu počtu vazeb mezi jednotlivými řetězci a současně snížení počtu volných reaktivních míst. Výsledkem tepelné úpravy je materiál s nižší rovnovážnou vlhkostí, vyšší rozměrovou stabilitou i odolností vůči působení dřevokazných hub a hmyzu. Modifikované dřevo se zpravidla vyznačuje vyšší křehkostí než dřevo neupravené (Raap 2001).

## **3.7 Impregnace dřeva**

V průběhu používání jsou výrobky ze dřeva vystaveny působení různých negativních vnějších vlivů. Většina poškození je způsobena mechanickým zatížením, opotřebením nebo biotickými či abiotickými činiteli. Dřevokazné houby a hmyz ke svému působení při rozkladu dřeva potřebují určitou teplotu a vlhkost. V našich klimatických podmínkách převažují tyto předpoklady větší část roku. Jednotlivé dřevokazné houby se však svými požadavky na vnější podmínky mohou lišit. V důsledku činnosti hub a hmyzu výrazně klesá životnost a funkčnost výrobků na bázi dřeva. V minulosti se chránily především železniční pražce, sloupy elektrického vedení, důlní dříví, dřevo pro stavebnictví, průmysl i zemědělství pomocí chemicky aktivních fungicidních a insekticidních prostředků. Většinou se však jedná o velmi

nebezpečné látky, které mohou být škodlivé jak pro člověka, tak i pro okolní faunu a flóru. Tyto ochranné chemické prostředky jsou buď jednoduché organické sloučeniny nebo jejich směsi, nebo látky organického původu. Jejich aplikace se řídí účelem použití. Hodnotí se jejich účinnost proti houbám (fungicidy), hmyzu (insekticidy) a ohni (antipyreny). Dále se sleduje jejich rozpustnost v různých typech rozpouštědel, schopnost pronikat do dřeva, vyluhovatelnost, trvanlivost a antikorozivnost. Impregnační látky by neměly korodovat dřevo ani materiály s ním spojené, především kovy. Jedním z nejsledovanějších faktorů je zdravotní nezávadnost. Látky se dělí podle možných účinků a to od na zdraví člověka neškodných až po látky, u kterých se kontakt člověka s chráněným dřevem nedoporučuje vůbec. V současnosti se jasně projevuje tendence ústupu od klasických ochranných látek na bázi těžkých kovů k látkám, které jsou méně škodlivé pro životní prostředí a přitom jinou formou zajistí dostatečnou ochranu dřeva. Jsou to například látky snižující rovnovážnou vlhkost dřeva nebo látky zvyšující objemovou hmotnost dřeva. Z hlediska kvality a rozsahu impregnace dřeva je nutné poznání průběhu celého procesu (Kollmann 1951, Horský 1987, Kafka 1989, Reinprecht 1992, Kurjatko 1993, Dejmal 1995).

Speciálním případem impregnace dřeva je využití difúze. Tento postup původně vyvinutý okolo roku 1930 v Německu (Osmose) byl založený na ponoření dřeva z čerstvě pokáceného stromu nebo dřeva o vysoké vlhkosti do roztoků látek pronikajících do struktury dřeva v důsledku vyrovnávání koncentrace účinné látky. Osmóza je potom speciálním typem pasivního transportu, při kterém přestupuje rozpouštědlo (nejčastěji voda) přes polopropustnou membránu (dřevo) z prostoru s méně koncentrovaným roztokem do prostoru s více koncentrovaným roztokem.

Velmi důležitou obecně platnou podmínkou je, aby byla impregnační látka v rámci technologického postupu vpravena do požadovaného místa struktury dřeva v daném časovém okamžiku, v požadované kvalitě a v požadovaném objemu. Jen tak může probíhat impregnace dřeva optimálním způsobem. Dřevo se nejčastěji impregnuje za účelem snížení příjmu vody v plynné nebo kapalné formě. To se potom může projevit na:

- zvýšení rozměrové stability,
- zlepšení mechanických vlastností,
- zvýšení biologické odolnosti,
- změně odstínu nebo barvy.

Impregnační látku lze aplikovat na povrch nebo do různé hloubky dřeva pomocí nátěrů, postřiků, ponořování, máčení nebo tlakovou impregnací.

Při impregnaci dřeva se příjem impregnační látky většinou zjišťuje přímo kvantitativním stanovením obsahu účinných látek pomocí analytických metod. Hloubka průniku impregnační látky se běžně stanovuje na příčném řezu nebo na vývrtu.

Příjem impregnační látky vyjádřený v kg na m<sup>3</sup> dřeva (Solution Uptake - SU) se počítá z rozdílu hmotnosti zkušebního tělesa po impregnaci a před impregnací vůči jeho objemu před impregnací.

Příjem impregnační látky, jako poměrné číslo vyjádřené v % (Relative Solution Uptake - RSU) se počítá z rozdílu hmotnosti vzorků ihned po impregnaci a před impregnací vůči hmotnosti jeho sušiny.

Přírůstek hmotnosti tělesa v % (Weight Percent Gain - WPG) se počítá z rozdílu hmotnosti klimatizovaného vzorku po impregnaci a před impregnací vůči hmotnosti jeho sušiny.

Procentuální účinnost modifikace proti bobtnání (Anti Swelling Efficiency - ASE) se počítá z porovnání hodnot bobtnání neošetřeného a ošetřeného vzorku. Tento termín vytvořil Stamm (1964) a popsal jej jako zmenšení bobtnání nebo sesychání impregnovaného dřeva ve srovnání s neošetřeným kontrolním vzorkem.

Bobtnání dřeva v důsledku impregnace (Bulking - B) se zjistí ze zjištěného objemu suchého vzorku před a po ošetření. Výsledek je uváděn v procentech.

Efektivnost omezení příjmu vlhkosti (Moisture Exclusion Efficiency - MEE) dává do poměru rozdíl vlhkostí ošetřeného a neošetřeného vzorku s vlhkostí vzorku neošetřeného. Vyjadřuje se v procentech (Rowell 1983, Militz 1997, Sint 2013). Možnost, jak hodnotit změnu počtu volných OH skupin, dává i měření smáčivosti povrchu pomocí kontaktního úhlu. Modifikace dřeva ovlivňuje velikost kontaktního úhlu na povrchu dřeva. Pokud se naměřený kontaktní úhel zvětšuje, znamená to, že povrch upraveného dřeva vodu více odpuzuje a naopak. Kromě uvedených kritérií se hodnotí i biologická odolnost a mechanické a fyzikální vlastnosti impregnovaného dřeva. Kvalitu impregnace lze ovlivnit dodržáním požadované doby procesu impregnace při znalosti druhu, rozměrů a vlhkosti dřeva, koncentrace a viskozity impregnační látky nebo parametry impregnačního procesu (teplota, tlak) (ČSN P CENT/TS 15979, ČSN EN 15228).

Podle hloubky průniku se impregnace zpravidla rozlišuje na povrchovou, prováděnou máčením, postřikem, nátěrem nebo ponořováním, mělkou (2 až 10 mm) a hlubokou. Průnik do dřeva ovlivňují druh a aktuální stav dřeva, vlastnosti impregnační látky a použitý způsob aplikace. Největší průnik impregnační látky strukturou dřeva je ve směru podélném, ve směru příčném je prostup tekutin výrazně nižší. Především díky dřevovým paprskům je propustnost v radiálním směru vyšší než ve směru tangenciálním. Vždy však závisí na anatomické stavbě a vlhkosti dřeva. Dřevo nasycené vodou lze impregnovat při normálním atmosférickém tlaku speciálními postupy založenými na osmóze. Při tlakové impregnaci hydrofobními olejovitými látkami je optimální vlhkost dřeva pod 25 %, pro vodné roztoky látek je doporučená vlhkost 30 až 40 %. S ohledem na rozměry většiny impregnovaných sortimentů je však průnik látek v příčném směru významný. U jehličnatých dřev může být maximální průnik podél vláken v řádu milimetrů od čela. Naopak u listnatých dřev to může být díky propojeným cévním článkům až několik metrů. Ani to však nemusí znamenat impregnaci v celém průřezu dřeva. U jehličnatých dřev (borovice, modřín) lze v příčném směru poměrně snadno impregnovat bělové dřevo. Výrazně horší průnik impregnační látky v tomto směru je u dřeva z jedle a smrku. V případě použití tlakové impregnace je maximální průnik pouze do hloubky asi 20 mm. Poměrně dobře se impregnuje bělové dřevo dubové a dřeva roztroušeně pórovitá. V celém průřezu se dobře impregnuje dřevo bukové v případě, že neobsahuje nepravé jádro. Pro všechna jehličnatá i listnatá dřeva s jádrem platí, že jádrové části jsou i v případě tlakové impregnace velmi málo propustné. Také reakční dřevo a suky mohou svou přítomností negativně ovlivnit průnik impregnační látky. Zajímavým zjištěním je, že činnost některých biotických činitelů (hub a bakterií) může pozitivně ovlivnit příjem impregnačních látek dřevem (Horský 1987, Reinprecht 1992).

K tlakové impregnaci by mělo být použito zdravé nepoškozené dřevo. Ve většině případů musí být dřevo před tlakovou impregnací bez kůry a lýka (odkornění do běla). Odkorněné dřevo musí být zbaveno všech nečistot. Pokud je to možné doporučuje se impregnovat hotové dílce nebo jejich polotovary, aby při dalším opracování nedošlo ke zbytečným ztrátám impregnační látky. Z důvodu podpoření zvýšení příjmu impregnační látky se doporučuje pařit napřed dřevo sytou parou. Zvlhčením se mírně zvýší propustnost a následné ochlazování dřeva může působit obdobně jako podtlak, který zvýší příjem impregnační látky na povrchu. Dřevo je vhodné před vlastní impregnací také propařit pokud klesne jeho teplota pod 5 °C. Paření se též používá i z důvodu usmrcení parenchymatických buněk před impregnací u bukového dřeva. Někdy se paření naopak uplatňuje na závěr procesu impregnace z důvodu fixace impregnační látky ve dřevě. Hromadně by se měl impregnovat současně materiál stejného druhu, rozměrů a vlastností.

Povrchová impregnace se provádí.....Impregnuje se v máčecích vanách (nádržích), komorách nebo kotlích (autoklávech) válcového tvaru. Velmi důležité je, aby vlastnosti

(koncentrace, viskozita a teplota) impregnační látky byly stejné v rámci celé náplně. Zařízení musí být zajištěno proti úniku impregnační látky do okolí. Impregnace je ukončena dostatečnou fixací impregnační látky v materiálu a odstraněním jejích případných přebytků. Při impregnaci ponořováním se mohou máčet celé balíky proloženého řeziva naráz. Tato technika je vhodná pouze pro krátkodobější ochranu povrchu dřeva.

Pokud ponoření trvá déle než 30 minut hovoří se o máčení. Dřevo musí být trvale ponořeno pod hladinou impregnační látky. Impregnují se tak sortimenty, které se z určitých důvodů nedají impregnovat v impregnačním kotli. Impregnační látka proniká pouze do hloubky několika milimetrů. Její příjem se dá mírně zvýšit různými způsoby nařezávání, navrtávání nebo napichování povrchových vrstev.

Tlaková impregnace dřeva se uskutečňuje v hermeticky uzavřených kovových horizontálních kotlích. Toto tlakové hermeticky uzavíratelné zařízení je konstrukčně poměrně složité. Zařízení v antikoročním provedení může být uzpůsobeno pro tlakovou i podtlakovou (vakuovou) impregnaci, která výrazně zvyšuje příjem impregnační látky dřevem. V autoklávu je možno zajistit potřebný tlak (do 900 kPa) a požadovanou teplotu impregnační látky. Různé délky (až 30 m) a průměry kotlů (do 2 m) umožňují impregnaci sortimentů rozličných rozměrů. Dřevo se při modifikaci podrobí zpravidla několik hodin trvající impregnaci. Při procesu impregnace se může různě kombinovat podtlak a přetlak prostředí tak, aby bylo dosaženo optimálního požadovaného příjmu impregnační látky pro daný rozměr, dřevinu a použití. Podle zvoleného způsobu impregnace může být dosaženo různého příjmu impregnační látky. V některých případech je žádoucí pouhá impregnace buněčných stěn (úsporná impregnace), z jiných důvodů je potřeba zaplnit i buněčné lumeny (úplná impregnace). Některé látky mohou se dřevem chemicky reagovat a měnit jeho vlastnosti - aktivní modifikace. Jiné chemikálie se dřevem nereagují a pouze svou přítomností vyvolávají žádoucí účinek - pasivní modifikace. Používají se jak speciální impregnační zařízení na olejovité látky, na vodou rozpustné roztoky nebo na látky ředěné organickými rozpouštědly, případně konstrukčně náročnější víceúčelová zařízení. Tlaková impregnace je zárukou až několikanásobného zvýšení životnosti dřeva (Kolman 1951, Horský 1987, Kafka 1989, Reinprecht 1992, Dejmal 2012). Při impregnaci dřeva se v uzavřeném prostoru autoklávu využívá kombinace různých tlaků. V zařízení je možno udržovat normální (atmosférický) tlak nebo vytvořit podtlak (vývěva), případně přetlak (kompresor). Pro řezivo a výrobky z něj se často používá pouze jednoduchá vakuová impregnace při sníženém tlaku prostředí. V tomto případě se nad materiálem vytvoří nejprve podtlak, a za podtlaku se do kotle (autoklávu) napustí impregnační látka. Potom se podtlak na určitou dobu zruší a materiál se máčí. V této části procesu ponořené dřevo přijímá impregnační látku. Následuje vypuštění impregnačního roztoku. Konečnou fází je opětná evakuace autoklávu (podtlak), aby byly odstraněny veškeré nežádoucí zbytky impregnační látky ze dřeva i z autoklávu.

Pokud je potřeba nasytit dřevo roztokem zcela, vytvoří se nad materiálem v první fázi podtlak a po určité době se napustí látka. Ve druhé fázi následuje přetlak. Po zrušení přetlaku se ve třetí fázi vypustí roztok a na krátkou dobu se vytvoří podtlak (Bethell). V případě, že je v zájmu zpracovatele úspora impregnační látky, vytvoří se po doplnění zavezeného kotle roztokem na určitou dobu přetlak. Po jeho zrušení a vypuštění roztoku se na krátkou dobu vytvoří vakuum, umožňující snížení příjmu látky. Pro dosažení požadovaného stupně impregnace existuje celá řada variant, které využívají opakování, kombinaci nebo úpravu uvedených postupů (Rüping).

Některé oleje nebo vodou ředitelné ochranné látky běžné koncentrace, jsou vůči dřevu netečné a jeho chemické vlastnosti prakticky nemění. Přítomnost olejů ve struktuře dřeva může však částečně snížit jeho pevnost, podobně jako přítomnost vody. Při tlakové impregnaci může v extrémních případech dojít k porušení celistvosti dřeva. Některé chemické látky se váží na dřevo, aniž by významně snižovaly jeho pevnost. V jiných případech se

používají i chemikálie, které mohou částečně nevratně narušit buněčnou stěnu dřevních elementů a mohou tak pevnost dřeva značně snížit. Jedná se například o látky na bázi amoniaku, které se také k modifikaci dřeva (barva, plastifikace) využívají – Lignamon (Kubín 1975, Weigl 2007, Weigl 2012). Na kvalitu impregnace mají kromě vlastní impregnační látky a faktoru času zásadní vliv i teplota a tlak uvnitř impregnačního autoklávu (Horský 1997).

### 3.7.1 Pryskyřice

Díky svým vlastnostem našly široké uplatnění při impregnaci dřeva syntetické pryskyřice. V letech 1930 až 1940 byly v USA vyvinuty různé materiály na bázi syntetickou pryskyřicí modifikovaného dřeva (Impreg, Compreg). Nejpoužívanější byla ve vodě rozpustná nízkomolekulární (monomerní) fenolformaldehydová pryskyřice, která má vysokou schopnost proniknout do buněčné stěny (Stamm 1941). Později se začaly používat i další synteticky vyrobené pryskyřice. Jedná se zejména o pryskyřice epoxidové, polyuretanové, ale i pryskyřice melaminformaldehydové a močovinoformaldehydové. Díky průniku do buněčné stěny se významně sníží rovnovážná vlhkost modifikovaného dřeva (blokování). Vysokomolekulární pryskyřice pronikají pouze do buněčných lumenů (Gindl 2003, Gabrielli 2008, Gabrielli 2010). Podle typu mohou být pryskyřice ředitelné vodou nebo organickými rozpouštědly. Kromě chemického vytvrzování lze úspěšně použít k vytvrzení syntetické pryskyřice konvekční, kontaktní nebo dielektrický ohřev. K impregnaci lze použít máčení v lázni nebo vakuově tlakové zařízení (Horský 1987, Reinprecht 1992).

Za značnou přednost lze u většiny syntetických pryskyřic považovat vysokou odolnost proti mechanickému namáhání v ohybu i v tlaku, vyšší tvrdost, odolnost proti oděru, rozměrovou stálost, minimální nasákavost a vysokou odolnost vůči běžně používaným chemikáliím. Další výhodou syntetických pryskyřic je, že modifikaci polymerní sítě při výrobě (typem a kombinací monomerních jednotek, stupněm síťování) je možné výše zmíněné fyzikální a mechanické vlastnosti pryskyřic „nastavit“ pro daný typ použití a předpokládané nároky. Na celkový výsledek modifikace má vliv počáteční vlhkost dřeva (Joščák 2006). Syntetické pryskyřice jsou ředitelné vodou nebo organickými rozpouštědly. Určitou nevýhodou použití některých syntetických pryskyřic např. močovinoformaldehydových, může být určitá křehkost. Mezi velmi odolné a značně stabilní prostředky, které jsou dlouhodobě k impregnaci dřeva používané patří syntetické epoxidové pryskyřice. Epoxidové pryskyřice navíc vykazují v porovnání s jinými vysokou houževnatost. Po úpravě vlhkosti dřeva sušením nebo pomocí etylalkoholu nebo acetonu následuje vlastní impregnace. Čerstvý roztok epoxidové pryskyřice se připraví promísením s tvrdidlem (diethylentriamin, dipropylentriamin). K dosažení požadované viskozity se pryskyřice může ředit acetonem v poměru 100 ku 3,5 nebo etylalkoholem (100 ku 4,5). Připravený roztok je zpravidla nahnědlé barvy. Může se nanášet na povrch, máčet nebo vakuově (tlakově) impregnovat. Po přidání tvrdidla je nutné aplikovat roztok ve stanoveném časovém limitu, aby nedošlo k vytvrzení pryskyřice ještě před vlastní impregnací. Za běžné teploty probíhá vytvrzování po dobu přibližně 24 hodin. Zvýšením teploty se výrazně zkracuje čas chemické reakce (Vodová 1977). Určitou nevýhodou modifikace dřeva syntetickými pryskyřicemi mohou být vyšší náklady na likvidaci již nepotřebného materiálu.

Při impregnaci dřeva do větší hloubky na průřezu se zkoumají možnosti vyššího využití přírodních pryskyřic, v minulosti používaných především při povrchové úpravě dřeva. Přírodní pryskyřice jako například kalafuna nebo mastix, jsou látky rostlinného původu. Látkou živočišného původu je šelak. Rostlinné pryskyřice se získávají z poraněných stromů, z nichž vytékají ve formě viskózních kapalin - balzámů, které tuhnou odpařením rozpouštědel nebo polymerací. Tyto pryskyřice nemají, bohužel, jednotné a stálé složení. Jsou to složité směsi, které obsahují pryskyřičné kyseliny, alkoholy, estery a fenoly. Hlavní složkou

přírodních pryskyřic jsou terpenoidy. Přírodní pryskyřice se rozpouštějí především organickými rozpouštědly (alkohol, benzín). Po vytvrzení jsou poměrně křehké. Výhodou použití přírodních pryskyřic k impregnaci dřeva je snadnější a ekologičtější likvidace nepotřebného modifikovaného dřeva (Kuriál 2002).

### 3.7.2 *Soli*

Chlorid sodný (NaCl) je chemická sloučenina, vyskytující se v přírodě v podobě nerostu halitu, známého pod označením sůl kamenná. Je to velmi důležitá chemická sloučenina potřebná pro životní funkce většiny organismů. Většina zásob chloridu sodného je obsažena v mořské vodě. Při impregnaci dřeva pomocí roztoku soli ve vodě vnikají tyto látky i do buněčných stěn. Zde mají prakticky stejnou koncentraci jako v okolních kapilárách. V důsledku následného odstranění vody (vysušení) se koncentrace soli v buněčné stěně značně zvýší a vytvoří se pevná složka. Výsledkem je snížené sesychání dřeva, které je dáno vyšším objemem soli v buněčné stěně či lumenu. Soli mají konzervační účinky a působí preventivně vůči činnosti plísní, dřevokazných hub a hmyzu. Nevýhodou tohoto způsobu impregnace dřeva je poměrně vysoká hygroskopicitu solí a v důsledku toho možnost ronění ze dřeva při vysoké vlhkosti okolního vzduchu. Další nevýhodou jsou korozivní účinky, především vůči některým kovovým spojovacím a upevňovacím prvkům. V případě kontaktu impregnovaného dřeva s kapalnou vodou dochází velmi snadno k vyplavování soli. Impregnace dřeva roztoky chloridu sodného se zkoumala především v přímořských zemích (Rodrigues-Navarro 1999, Lesar 2009, Pařil 2012) Širší uplatnění se však pro tuto látku při impregnaci dřeva prozatím nenašlo.

### 3.7.3 *Sacharidy*

Pro rozměrovou stabilizaci dřeva se v širším měřítku začala používat v přírodě relativně dostupná sacharóza, která se navíc získává z tzv. obnovitelných zdrojů. Vodný roztok cukru (disacharidu) byl poprvé pro rozměrovou stabilizaci vodou nasyceného archeologického dřeva použit v Itálii v r. 1970 (Kafka 1989, Pařil 2012). V porovnání se solí kamennou nebo polyethylenglykolem (PEG) má použití vodného roztoku cukru řadu výhod. Chemická struktura sacharózy je podobná celulóze, má nízkou molekulovou hmotnost a snadno a rychle proniká do struktury dřeva. Je rozpustná ve vodě i při normální teplotě, takže impregnační lázeň nevyžaduje zahřívání. Po vysušení má strukturu vhodnou pro zpevnění dřeva. Metodu napouštění dřeva cukry používali doposud především archeologové a konzervátoři. Lze ji charakterizovat jako poměrně levnou a dostupnou. Z chemického hlediska je také třtinový nebo řepný cukr ( $\alpha$ -D-glukopyranosyl- $\beta$ -D-fruktofuranosyl) dobře rozpustný ve vodě, není toxický a nekoroduje. Pro zlepšení vlastností vodných roztoků cukrů se před impregnací přidávají ještě další látky jako manitol, maltitol, laktiol, polyethylenglykol a biocidní látky. Přítomné katalyzátory podporují a regulují reakci vytvrzování. Přítomnost biocidních látek je nutná z toho důvodu, že mikrobi žijící v roztoku sacharózu hydrolyzují na monomery (D-glukózu a D-fruktózu). Směs sacharózy a jejích degradačních produktů potom dostatečně nekrytalizuje a vytváří lepivý sirup. Mikrobi mohou svou činností ve dřevě produkovat značné množství oxidu uhličitého, takže dřevo může následně nabobtnat a prasknout. Bylo zjištěno, že sacharóza proniká do buněčných dutin, kde může krystalizovat, a do buněčných stěn, kde tvoří tenkou amorfní sklovitou vrstvu). Modifikované dřevo má vyšší rozměrovou stabilitu v prostředí s kolísavou relativní vlhkostí. Uvádí se, že hygroskopicitu dřeva klesá se stoupajícím obsahem cukru ve dřevě. Tento fakt byl zdůvodněn tím, že se sacharóza váže na řetězce celulózy vodíkovými můstky. Úprava dřeva je nehořlavá, neexplozivní a z toxikologického hlediska bezpečná. Materiál má vyšší objemovou hustotu, tvrdost a pevnost. Po ošetření dřeva je zachován jeho přirozený vzhled. Výhodou je relativně nízká cena roztoku. Je-li dřevo impregnované sacharózou uloženo v prostředí o relativní vlhkosti

vyšší jak 75 %, absorbuje sacharóza vzdušnou vlhkost a povrch modifikovaného dřeva se stává mokřím. Doporučuje se proto uložení a upotřebení cukrem modifikovaného dřeva v prostředí o relativní vlhkosti nižší než 70 %. U nechráněného impregnovaného dřeva by mohlo v případě kontaktu s kapalnou vodou dojít k vyplavování cukru (Págo 1989, Morgos 1993).

U archeologického dřeva je penetrace sacharózy ovlivněna stupněm degradace dřeva. Parenchymatické buňky vykazují intenzivnější příjem sacharózy. Impregnovat ponořováním lze při normální teplotě (20 °C) a atmosférickém tlaku dřevo značně poškozené (archeologické). Je však nutné upozornit, že po ošetření sacharózou může při sušení dojít, na rozdíl od ošetření polyethylenglykolem (PEG), k určitému zborcení dřeva. Výsledné seschnutí příčného průřezu takto ošetřeného dřeva, vztažené na rozměry vodou nasyceného dřeva před ošetřením, kolísá v případě stabilizace sacharózou v rozmezí 0 až 20 %, zatímco po ošetření polyethylenglykolem (PEG) je to jen 0 až 5 %.

Pod názvem Indurite (Osmose) byl zkoumán průmyslový postup impregnace dřeva sacharidy. Metoda úpravy dřeva pomocí vodného roztoku přírodních cukrů (polysacharidů), získaných ze sóji a kukuřice byla vypracována na Novém Zélandu. Aplikována byla na borovici, pěstovanou plantážním způsobem. Modifikace je prováděna za účelem zvýšení tvrdosti a rozměrové stability především borového dřeva. V současnosti se tento impregnační postup používá například k impregnaci mechanicky extrémně zatěženého dřeva zejména na podlahy (Hill 2006, Lesar 2009).

Impregnační proces se provádí při změněném tlaku prostředí. Vodný roztok přírodních polysacharidů Indurite (Osmose), který je chemicky blízký celulóze, obsahuje i katalyzátory, které podporují a regulují reakci vytvrzování. Polysacharidy neboli glykany jsou makromolekulární látky složené z více než deseti monosacharidů nebo jejich derivátů, které jsou vzájemně vázány glykosidickými vazbami. Jsou také surovinou pro výrobu modifikovaných škrobů, některých cukrů a cukerných derivátů. Lineárním polysacharidem je i celulóza.

Proces probíhá v tlakové impregnační nádobě. Při experimentech bylo zjištěno, že borové řezivo nemá mít před impregnací příliš nízkou vlhkost. Po vložení řeziva a hermetickém uzavření nádoby se na jednu hodinu vytvoří podtlak okolo 20 kPa. Následuje napouštění impregnačního roztoku a dvouhodinové zvýšení tlaku na 900 kPa. Po vypuštění roztoku z impregnační kotle je řezivo vyjmuto a sušeno. V první fázi se suší asi jednu hodinu při teplotě 40 °C, potom následuje 12 hodinové sušení při teplotě 60 °C. Kromě propustnosti materiálu jsou viskozita a teplota roztoku a tlak prostředí rozhodujícími faktory úspěšnosti procesu. Optimální teplota roztoku je 20 °C. Roztok se může přibarvovat do různých odstínů. Pro tento způsob modifikace dřeva je charakteristické, že se zvýšením objemové hustoty a rozměrové stability zhodnocuje domácí dřevní surovina a rozšiřují se tak možnosti jejího uplatnění (Kafka 1989, Hill, 2006, Pařil 1012).

Při řezání modifikovaného dřeva je podélný řez čistý s dobře definovanými hranami. Stopy po zubech nástroje jsou, ve srovnání s neupraveným dřevem, méně hluboké. Při příčném řezání se snížil výskyt trhlin a vyštípování třísek na čelech. Ošetřené dřevo se lépe brousí. Stopy po řezání byly z modifikovaného dřeva odstraněny mnohem rychleji. Může však docházet k rychlejšímu zanášení brusného pásu. Při rovinném frézování získá dřevo hladký a čistý povrch. Je redukován počet otevřených pórů. Ošetřené dřevo se lépe vrtá a soustruží. Vruty se zápusťou hlavou se dobře šroubují a nezvedají dřevní vlákna. Při aplikaci vrutů se doporučuje předvrtání otvorů. Byla zjištěna zvýšená rezistence proti dřevokazným houbám a prokázána nižší hořlavost (BRE 2005).

Dřevo modifikované vodnými roztoky polysacharidů je vhodné pro podlahy do interiéru, na nábytek, regály, okna a dveře. Dá se dokonce použít na terasy a zahradní nábytek (BRE

2005). Nepotřebný materiál nebo odpad se dá poměrně snadno likvidovat, což je dáno převážně přírodním charakterem impregnační látky.

#### **3.7.4 Křemičitany**

Křemičitany (silikáty) jsou kyslíkaté sloučeniny křemíku. Jsou to látky zpravidla ve vodě nerozpustné, až na křemičitany alkalických kovů - vodní sklo ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). V kyselinách jsou rozpustné křemičitany vápenaté, hlinité a železité. Tyto křemičitany bývají součástí přírodních minerálních surovin pro průmysl stavebních hmot. Všechny křemičitany lze rozpustit za vysokých teplot v koncentrovaných roztocích alkalických hydroxidů.

Za účelem zvýšení trvanlivosti a tvrdosti dřeva byly vyzkoušeny různé křemičité směsi. Některé výzkumy ukázaly poměrně snadnou impregnaci běle dřeva z borovice. Běl byla impregnována pomocí koloidních disperzí částic oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ) o rozměru 15 až 30 nm. Křemenná koloidní disperze je poměrně levná a dostupná. Je běžně používána jako anorganické pojivo pro povrchovou úpravu nebo ve stavebnictví. Po dvou letech trvání jednoho zahraničního experimentu, vykazovaly vzorky modifikovaného dřeva lepší vlastnosti než vzorky neupravené. Byl vysloven předpoklad, že trvanlivost impregnovaného bělového dřeva borovice je podobná jako u dřeva jádrového (Terziev 2005).

Výzkum s roztoky křemíku na bukovém dřevě byl prováděn v roce 2009 i u nás (Martinek 2009). Vzorky bukového dřeva byly impregnovány pomocí vakuové impregnace různými roztoky křemíku. Výsledky ukázaly významné zvýšení tvrdosti a naznačovaly částečné snížení navlhavosti modifikovaného dřeva. Tvrdost modifikovaných vzorků byla přímo úměrná obsahu křemičitanů. Maximální zjištěná tvrdost podle Brinella v podélném směru při 12% vlhkosti vzorku modifikovaného dřeva byla až 90 MPa. Literatura uvádí u bukového dřeva průměrnou tvrdost v podélném směru asi 61 MPa (Matovič 1993). Maximální rovnovážná vlhkost modifikovaného dřeva se v důsledku impregnace roztokem křemičitanu snížila až na 22 %. Přitom mez hygroskopicity bukového dřeva se obvykle uvádí více jak 30 %. Určitou nevýhodou úpravy dřeva pomocí sloučenin křemíku je jeho vyšší křehkost.

V roce 2005 dokázali vědci vytvořit v laboratorních podmínkách „zkamenělé dřevo“ (Shin 2005). Proces, který v přírodě trvá miliony let, se unikátní metodou podařilo zkrátit na pouhých několik dní. Ze dřeva borovice a topolu, byla vyřezána malá zkušební tělíska. Ta pak byla na dva dny ponořena do kyseliny. Na další dva dny do křemičitého roztoku. Následovalo vysušení. Vysušené dřevo bylo potom vloženo do hermeticky uzavřeného autoklávu naplněného argonem. Teplota uvnitř autoklávu postupně rostla až k 1 400 °C. Na závěr procesu se tělíska v inertní atmosféře argonu zchladila. Křemík vytvořil společně se zbylým uhlíkem keramickou sloučeninu, vyznačující se velkou tvrdostí - karbid křemíku ( $\text{SiC}$ ). Vzniklý materiál je na první pohled podobný původnímu dřevu, ale má naprosto odlišné chemické složení i vlastnosti. Struktura nového keramického materiálu částečně odpovídá původní matici dřeva. Materiál má propustné kanálky a póry tvarově velmi podobné původním stavebním prvkům dřeva. Díky obrovské vnitřní ploše jednotlivých pórů lze předpokládat využití tohoto nového materiálu jako speciální separačně filtrační struktury.

#### **3.7.5 Vosky a oleje**

Pro impregnaci dřeva se i z historického pohledu nabízí použití vosků a olejů. V minulosti se tyto látky používaly převážně k povrchové úpravě dřeva. Výjimku tvořily dehtové oleje, používané i k tlakové impregnaci. Proniknutí vosků do struktury dřeva je poměrně složité. Pro tento účel byl vyvinutý speciální impregnační postup Cellosolve. Využívá se při něm schopnost kapalného ethylenglykolmonoethyleteru ( $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2$ ) mísit se s vodou a současně rozpouštět vosk. Cellosolve je označení skupiny organických rozpouštědel založených na etylenglykoléru. Podstata procesu spočívá v postupném nahrazení vody ve struktuře dřeva



látkou na bázi Cellosolve a následném ponoření takto upraveného dřeva do taveniny vosku. Vosk difunduje díky rozpouštědлу až do buněčných stěn. Modifikaci lze urychlit aplikací sníženého tlaku uvnitř impregnačního autoklávu. Po odstranění rozpouštědla a ochlazení zůstává uvnitř dřeva vosk v pevném skupenství. Odolnost modifikovaného dřeva vůči působení vlhkosti se tak významně zvýší. Metoda je však poměrně zdlouhavá a při práci s chemikáliemi hrozí riziko poškození zdraví (Darrel 1973).

Jednou z možností spíše pasivní úpravy vlastností dřeva hydrofobními látkami je impregnace dřeva oleji. K impregnaci slouží různé impregnační postupy. Zajímavou variantou úpravy dřeva, v minulosti málo využívanou, je tlaková impregnace dřeva zejména přírodními oleji. Úspory oleje lze dosáhnout použitím emulze oleje a vody. Výhodou impregnačních olejů je jejich hydrofobnost, která podporuje zvýšení rozměrové stability dřeva. Poměrně silná toxicita některých olejů vůči dřevokazným houbám a hmyzu zvyšuje biologickou odolnost modifikovaného dřeva. Oleje jsou ve dřevě poměrně dobře fixovány a nemají korozivní účinky. U přírodních olejů může být jistou nevýhodou zápach a nestálé chemické složení. Před impregnací je třeba upravit poměrně vysokou viskozitu olejů zvýšením teploty nebo zředěním organickými rozpouštědly. Oleje mohou negativně ovlivnit kvalitu povrchové úpravy a v některých případech způsobují i snížení pevnosti dřeva. Zhoršení mechanických vlastností je vysvětlováno vznikem mikroskopických trhlinek, lokalizovaných v blízkosti dřevových paprsků. Dostane-li se olej do dřevní struktury, může se objevit dodatečné poškození na mikroskopické úrovni, lokalizované většinou ve vrstvách buněčné stěny nebo v mezibuněčných prostorech. Popisovaný mechanismus může vysvětlovat fakt, že silnější poškození se vyskytuje v blízkosti přechodu mezi jarním a letním dřevem. Mechanická bariéra, způsobená buňkami letního dřeva, deformuje buňky jarního dřeva zaplněné olejem a tím vzniká dodatečné poškození v jednotlivých vrstvách buněčné stěny (Megnis 2002).

Přírodní oleje, které se v minulosti používaly pouze k povrchové úpravě dřeva, se začínají používat v kombinaci s moderními metodami tlakové impregnace dřeva a částečně tak nahrazují oleje syntetické (Calignum). Lněný olej je čirý žlutý. Získává se ze sušených zralých semen lnu setého. Díky dobrým polymerizačním vlastnostem se lněný olej jako impregnační látka používá samotný, případně ve směsi s jinými oleji, vosky, pryskyřicemi a rozpouštědly. Tungový olej, který se lisuje z jader plodů prýscovitých stromů velmi rychle schne díky vysokému obsahu dvojných vazeb (kyselina eleostearová -  $C_{17}H_{29}COOH$  obsahuje tři dvojně vazby). Velmi dobře odolává povětrnosti. Nejčastěji se využívá jeho kopolymer se lněným olejem. Ze semen skočce obecného se získává ricinový olej. Ricinový olej je bezbarvá až velmi světle žlutá jedovatá kapalina s typickým zápachem. Pro impregnaci dřeva lze použít i různé směsi olejů, případně směsi olejů a vosků. Viskozitu lze upravit organickými ředidly nebo změnou teploty (Linde 1997).

### **3.7.6 Směsi vosků, olejů a pryskyřic**

Současným trendem se stává hluboká impregnace dřeva pomocí různých směsí přírodních olejů, vosků a pryskyřic. V roce 2005 byl například vyvinutý výrobní postup, který zlepšuje vlastnosti masivního dřeva pomocí penetrace směsi přírodních látek (pryskyřice, olej a vosk) do buněčných stěn a dutin dřeva (Natwood). Tekutá horká směs přírodní pryskyřice, oleje a vosku vniká do dřeva vlivem zvýšeného tlaku prostředí uvnitř impregnačního autoklávu. Postup nahrazuje impregnaci dřeva karcinogenními látkami na bázi mědi, chrómu či arzenu (CCA). Produkt má nižší cenu než materiály na bázi tzv. dřevopolymerů. Materiál má vyšší pevnost než tepelně upravené dřevo. Výsledný produkt tmavšího odstínu má vyšší objemovou hmotnost, vyšší hydrofobnost, až o 60 % vyšší povrchovou tvrdost a o 50 % vyšší rozměrovou stabilitu. Kromě těchto faktorů má zvýšenou odolnost vůči působení biotických činitelů, vyšší odolnost vůči UV záření, snížený výskyt trhlin a nižší hořlavost. Po obrobení má charakteristický hladký povrch. Materiál je šetrný k životnímu prostředí, při výrobě jsou

použity převážně suroviny z přírodních zdrojů a moderní technologie tlakové impregnace. Je vhodný především pro výrobu vodě odolných podlah, obkladů, oken a dveří do vlhkého prostředí v interiéru i exteriéru (Wimmer 2013).

### **3.7.7 Polyetylen glykol (PEG)**

Jednou z možností jak zachovat, případně zlepšit materiálové vlastnosti mokrého archeologického nebo dřeva o vysoké vlhkosti je jeho impregnace polyetylen glykolem (PEG). Tuto pasivní metodu impregnace používanou především v konzervátorské praxi, je možné použít i pro úpravu drobných dřevěných předmětů netradičních tvarů. Voda ve dřevě je v důsledku difúze postupně nahrazena polyetylen glykolem (Págo 1989). Polyetylen glykol ( $\text{HO-CH}_2\text{-(CH}_2\text{-O-CH}_2\text{)-}_n\text{-CH}_2\text{-OH}$ ) je syntetická polymerní látka voskovité konzistence, avšak velmi dobře rozpustná ve vodě. Nízkomolekulární PEG do molekulové hmotnosti 1 000 je kapalná látka. Nad hranicí 2 000 je to už látka pevného skupenství. PEG s molekulovou hmotností okolo 4 000 je za normální teploty tvrdá, suchá a nehygroskopická látka. Kromě vody jsou polyetylen glykoly rozpustné v řadě organických rozpouštědel (alkohol, aceton). Rozpustnost klesá s rostoucí molekulovou hmotností a naopak roste s teplotou. S ohledem na vysokou cenu se u nás touto látkou impregnují pouze menší dřevěné artefakty; ve světě i velké objekty, jako například dřevěný vrak švédské historické lodi Vasa (Mitchell 1972, Págo 1989, Almkvist 2008).

Princip konzervace mokrého dřeva spočívá v tom, že vodný roztok polyetylen glykolu proniká za normálního atmosférického tlaku a zvýšené teploty v lázni v důsledku difúze (osmózy) do struktury dřeva až do stavu nasycení. Voda je postupně nahrazována polyetylen glykolem. Podle aktuální potřeby se volí počáteční koncentrace konzervační lázně. Konzervace probíhá v nerezavějících nádobách zpravidla při normálním tlaku vzduchu (Hamilton, 1999). K účinnější difúzi impregnační látky lze přidat 25 až 50% etylalkohol ve směsi s vodou v poměru 3 ku 1 až 1 ku 1. Roztok se může pozvolna zahřívat na 40 až 70 °C. Voda se postupně odpařuje a koncentrace polyetylen glykolu v roztoku následně roste. Po dosažení požadované koncentrace následuje zvýšení teploty až na 85 °C. Tato teplota se udržuje po dobu asi dvou dnů. Po vyjmutí z lázně se povrch dřeva očistí vodou s lihem v poměru 1 ku 1. Po úpravě se významně sníží vlhkost dřeva a zvýší se jeho pevnost. Celý proces závisí na druhu, rozměrech, vlhkosti, případně na stupni poškození dřeva. Impregnaci je možno provádět máčením velkých předmětů přímo na místě nálezů historického dřeva nebo u menších kusů v laboratorních podmínkách. Nevýhodou je možné vyluhování látky ze dřeva, proto by mělo být takto ošetřené dřevo uloženo pouze v interiéru.

Při použití nízkomolekulárních polyetylen glykolů (PEG) se projevuje jejich vyšší hygroskopicitu. Na povrchu ošetřeného dřeva se potom může tvořit nežádoucí lepkavá vrstva. Vysoká cena polyetylen glykolu (PEG) a poslední poznatky naznačující jisté nevýhody brání širšímu uplatnění této difúzní metody úpravy dřeva v konzervátorské praxi u nás. Přes většinu pozitivních zkušeností konzervátorů s touto látkou nové výzkumy naznačily, že PEG může po určité době dokonce způsobit určitou degradaci hemicelulóz v ošetřeném dřevě. Proto je používání této impregnační látky v poslední době předmětem dalšího výzkumu (Almkvist 2008, Dejmal 2011).

### **3.7.8 Dimethyloldihydroxyethylenmočovina (DMDHEU)**

Proces, který se řadí k aktivní chemické modifikaci na úrovni buněčné stěny je úprava (impregnace) dřeva pomocí dimethyloldihydroxyethylenmočoviny (síťování). Sesíťováním (provázáním) volných hydroxylových skupin pomocí DMDHEU dojde k výraznému zlepšení fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. To může vést ke zvýšení využití tuzemských dřev a částečné náhradě dřev tropických. Nový materiál na bázi modifikovaného masivního dřeva byl odborné veřejnosti představen roku 2005 (Belmadur) (BASF 2005). Původně byla

látku DMDHEU používána v textilním průmyslu ke zvýšení hydrofobnosti textilií s obsahem bavlny. Dřevo je v prvním kroku výrobního procesu impregnováno roztokem DMDHEU v tlakové impregnační nádobě pomocí tlaku a podtlaku prostředí úspornou metodou prázdných lumenů buněk. Výhodou této impregnace je, že ke změně dochází pouze na úrovni buněčné stěny a že buněčné lumény zůstávají prázdné. Ve druhém kroku dochází v komoře při teplotách vyšších jak 100 °C k vytvrzení účinné látky a vzájemnému vytvoření chemických vazeb mezi některými volnými (reaktivními) OH skupinami v rámci buněčné stěny dřeva. Modifikované dřevo potom lépe odolává vlivům počasí, má nižší rovnovážnou vlhkost, má vyšší rozměrovou stabilitu, má mírně zvýšenou objemovou hmotnost i tvrdost. Samotná úprava nevyvolává změnu barvy dřeva. Přidáním barviva do impregnační látky může dřevo získat různé barevné odstíny. Dřevo se zpravidla ošetřuje (impregnuje) po celém průřezu. Molekuly DMDHEU jsou velmi malé, proto je úprava šetrná a přitom účinná (Hill 2006, Militz 2011). Materiálu tak zůstávají požadované tepelně-izolační a zvukově-izolační vlastnosti. Pigmenty a barviva mohou být pro impregnaci materiálu dodávány podle specifických požadavků. Vzhledem k tomu, že impregnační látka byla původně úspěšně používána a odzkoušena v textilním průmyslu, je zde základ, že i modifikované dřevo je zdravotně nezávadné. Jedná se o trvalou aktivní chemickou změnu na úrovni buněčné stěny dřeva. Díky výslednému síťování jsou emise škodlivých těkavých organických látek (VOC) v důsledku této úpravy dokonce nižší jak u neupraveného dřeva. Proces úpravy zvyšuje tvrdost a poskytuje uplatnění pro náročné podmínky, například na podlahy. Dá se obrábět a zpracovávat stejně jako neupravené dřevo o vyšší objemové hmotnosti. Bukové dřevo modifikované technologií Belmadur je asi dvakrát tvrdší než dřevo dubové. Technologie může být aplikována i na dřeva jehličnatá, například na borovici. Modifikované dřevo buku nebo borovice má rozměrovou stabilitu podobnou dřevu z teaku (Belmadur 2013).

### 3.7.9 Furfurylalkohol (FA)

Použití furfurylalkoholu ( $C_5H_6O_2$ ) jako možnosti pro aktivní chemickou úpravu dřeva (síťování) bylo popsáno Goldsteinem už v roce 1960. Z hlediska chemické modifikace dřeva v oblasti buněčné stěny je reakce charakterizována jako síťování. Jedná se o kyselou velmi komplexní katalickou reakci furfurylalkoholu ve dřevě. Výsledkem je vysoce rozvětvená síť furanových polymerů, propojených s polymery buněčných stěn dřeva. Jedná se o nevratnou úpravu, při které impregnační látka dobře proniká celou buněčnou stěnou.

Furfurylalkohol (2-hydroxymethylfuran) je organická sloučenina furanu a hydroxymethylové skupiny. Vyrábí se hydrogenací furalu. Furfural je základní surovinou pro výrobu furfurylalkoholu. Vyrábí se hydrolýzou hemicelulózy. Základní surovinu pro výrobu tvoří rostlinné zbytky, kukuřičné klasy a výlisky z cukrové třtiny. Běžně se používá jako rozpouštědlo v průmyslu plastů a při organické syntéze. Furfurylalkohol je bezbarvá až nahnědlá kapalina rozpustná ve vodě. Uvolňuje těkavé páry a za přítomnosti vzduchu může explodovat. Je klasifikován jako nebezpečný, zdraví škodlivý, zejména při vdechnutí nebo styku s pokožkou nebo sliznicí. V místnosti, kde se s touto látkou pracuje je nutné zabezpečit odsávání.

Od 70. let 20. století se pro modifikaci dřeva využíval furfurylalkohol v USA komerčně. V Evropě byly práce po roce 1990 postupně prohlubovány a rozvíjeny (Schneider 1995). Na konci 90. let 20. století bylo dřevo upravené pomocí furfurylalkoholu úspěšně pod názvem Kebony zavedeno do průmyslové výroby (Wood Polymer Technologies - WPT 2013). Při tomto procesu, se furfurylalkohol pomocí vakuově tlakové impregnace vpraví do struktury buněčné stěny, kde je následně polymerizován do furanových polymerů, které zasíťují a zpevní buněčnou stěnu. Účinná látka proniká celou strukturou buněčné stěny upravovaného dřeva. Chemická změna na úrovni buněčné stěny dřeva je trvalá, jedná se o aktivní modifikaci

dřeva na úrovni buněčné stěny. Proces modifikace buněčných stěn se skládá z vakuově-tlakové impregnace, vytvrzování a sušení.

Pro tento materiál je charakteristická vysoká rozměrová stabilita, trvanlivost, odolnost proti kyselinám, zásadám, houbám a hmyzu. Modifikované dřevo má velmi podobné vlastnosti jako některá tropická dřeva. Odolnost proti houbám a termitům je stejná jako u impregnačních postupů využívajících vysoce toxické CCA látky. Zvýšená je i odolnost tímto způsobem upraveného dřeva v mořském prostředí. Až o 45 % se zvýšila rozměrová stabilita a tvrdost modifikovaného dřeva. Modul pružnosti a ohybová pevnost se po impregnaci prakticky nemění (Esteves 2011).

Materiál, který může mít po úpravě tmavší odstín se používá především na obklady, podlahy, terasy i střechy. Je vhodný pro použití jak ve vlhkém prostředí interiérů (koupelny, bazény, sauny), tak v exteriéru (domy, vodní stavby). V roce 2008 byl v Norsku uveden do provozu další závod na výrobu dřeva modifikovaného furfurylalkoholem.

### 3.7.10 Anhydrid kyseliny octové

K aktivním chemickým modifikacím, které probíhají na úrovni buněčné stěny dřeva se řadí i reakce acetylových skupin anhydridů s OH skupinami - acetylace dřeva (roubování). Historie této modifikace sahá až do první poloviny 20. století. Už v letech 1928 a 1946 byl popsán pozitivní vliv acetylových skupin některých látek na rozměrovou stabilitu dřeva (Fuchs 1928, Tarkow 1946, Rowell 1983, Rowell 1991). K průmyslové výrobě a širšímu uplatnění dochází ale až na začátku 21. století v Holandsku (Accoyawood, Titanwood). Dřevo je modifikováno anhydridem kyseliny octové pomocí esterové vazby za vzniku vedlejšího produktu – kyseliny octové. Z chemického hlediska bývá tato reakce označována jako roubování. Pro průnik látky do struktury buněčné stěny je důležité, že molekula kyselého anhydridu má v průměru 0,7 nm a mikropóry v buněčné stěně dřeva při vlhkosti na mezi hygroskopicity měří 2 až 4 nm. Úpravu lze provádět prakticky na všech druzích dřev. Důležitou roli zde hraje propustnost dřeva. (Rowell 1983) uvádí, že z jednotlivých dřevních polymerů s anhydridem nejlépe reaguje přes OH skupiny lignin, následují hemicelulózy, nejméně reaguje celulóza.

K reakci acetylových skupin anhydridu s OH skupinami dřeva dochází v prostředí par nebo přímo v kapalně fázi za přítomnosti katalyzátoru ve speciálním impregnačním autoklávu z nerezové oceli. Výsledek reakce je závislý především na vlastnostech dřeva (obsahu extraktivních látek, velikosti modifikovaných vzorků, druhu dřeva, hustotě dřeva, vlhkosti dřeva, propustnosti), vnějších podmínkách (tlaku, teplotě a čase), způsobu ukončení procesu (extrahování ředidla, vakuování, ohřevu, omývání ve vodě, ošetřování v páře). Nevratná chemická reakce se odehrává na úrovni buněčné stěny. Vlhkost dřeva by měla být co nejnižší (2 až 7 %). Pokud má dřevo vyšší vlhkost nastane zpravidla problém, protože molekuly vody reagují s kyselým anhydritem. Tvoří se tak kyselina octová, což má vliv na snížení obsahu reagentu. Současně je potřebné, aby vlhkost byla ve dřevě rozložena rovnoměrně. Reakce musí proběhnout rychle a stejně intenzivně v celém průřezu dřeva (Rowell 1991). Většina acetylačních reakcí probíhá při teplotách od 100 do 140 °C, zpravidla v podmínkách kombinace vakua a tlaku (Beckers 1994). Při výrobě se používá dřevo borovice montereyské – paprsčité (*Pinus radiata*), dovážené do Holandska z Nového Zélandu a Čile.

Podobně jako v jiných případech impregnace je příjem anhydridu dřevem charakterizován pomocí hmotnostního přírůstku (WPG). Dřevo v průběhu acetylace trvale mírně nabobtná, díky náhradě (substituci) menších hydroxylových (OH) skupin většími skupinami acetylovými (-R-CH<sub>3</sub>). Vzhledem k tomu, že acetylové skupiny po modifikaci zabírají ve struktuře dřeva původně volná vazebná místa, nemohou se na ně již navázat molekuly vody. Modifikací (acetylací) je dosaženo snížení rovnovážné vlhkosti dřeva a současně jsou tak eliminovány rozměrové změny spojené s příjmem vlhkosti v daném prostředí. Pro acetylaci dřeva obecně platí, že při 20 % hmotnostním přírůstku (WPG) je rozměrová stabilita o 70 %

vyšší. Rozměrové změny v důsledku příjmu vlhkosti jsou redukovány až na jednu čtvrtinu oproti neošetřenému dřevu. Zvýší-li se při vlastní acetylaci hmotnost dřeva o 20 %, nepřevyší v budoucnu ve vzdušném prostředí obsah vlhkosti modifikovaného dřeva 10 %. Rozbor sorpčních izoterem neošetřeného a acetylovaného dřeva ukazuje pokles rovnovážné vlhkosti. Rozdíl mezi sorpcí a desorpcí (hystereze sorpce) při tom zůstává u acetylovaného dřeva obdobný jako u dřeva neupraveného (Accoya 2014).

Z hlediska odolnosti vůči působení enzymů dřevokazných hub je důležité to, že díky snížení počtu volných OH skupin je významně omezena možnost reakce enzymů hub s acetylovaným dřevem. Podle stupně acetylace (nad 20 %) může být dřevo hodnoceno jako „velmi odolné“. To se projevilo nižším úbytkem hmotnosti acetylovaného dřeva oproti dřevu neupravenému při ataku enzymy dřevokazných hub. Také sama nižší rovnovážná vlhkost je příčinou vyšší odolnosti modifikovaného dřeva v prostředí se zvýšenou vlhkostí. Podle potřeby může být dosažen různý stupeň acetylace dřeva. Vazba acetylových skupin na dřevo je velmi silná a ani po dlouhodobém cyklickém působení vody nebyl hmotnostní úbytek významný. Nový materiál je šetrný vůči životnímu prostředí. Acetylované dřevo může být použito i jako výchozí surovina pro výrobu velkoplošných materiálů. Kromě masivního dřeva zle acetylovat třísky nebo dýhy (Militz 1991).

Pro acetylaci dřeva je charakteristické, že v důsledku reakce nedochází ke změně odstínu barvy dřeva. Naopak je pozoruhodné, že acetylované dřevo má sníženou citlivost vůči působení ultrafialového záření. Během acetylace se redukuje počet polárních vazeb také na povrchu dřeva, což dlouhodobě snižuje nežádoucí tmavnutí odstínu dřeva. Modifikované dřevo tak vydrží dlouhou dobu přirozeně světlé.

Při lepení a povrchové úpravě je důležité, že modifikace dřeva acetylací ovlivňuje velikost kontaktního úhlu na povrchu dřeva. Kontaktní úhel se zvětšuje, což znamená, že povrch upraveného dřeva některé kapaliny více odpuzuje (Rowell 2005, Hill 2006). To může částečně zhoršit přilnavost některých lepidel a laků. Ukázalo se ale, že například polyuretanové laky mají vůči takto upravenému dřevu přilnavost velmi dobrou (Accoyawood, Titanwood). Jistou nevýhodou při využívání acetylovaného dřeva je nutnost používání nerezavějících kovových spojovacích prvků.

Změnu mechanických vlastností acetylovaného dřeva může ovlivnit teplota, čas a chemická reakce vedlejších produktů se dřevem. V důsledku příjmu anhydridu se také mírně naruší vazby mezi jednotlivými stavebními elementy dřeva a se částečně sníží objemová hmotnost dřeva. Na druhé straně se v důsledku snížení rovnovážné vlhkosti pevnost upraveného dřeva ve srovnání s neupraveným dřevem významně zvýší. Zle konstatovat, že k zásadní změně pevnosti nedojde. Takto modifikované dřevo lze používat i na nosné prvky konstrukcí a staveb (mosty) (Accoya 2014). Různé druhy modifikovaných dřev se mohou mírně lišit mírou změny pevnosti. Bylo také zjištěno, že i mezi jednotlivými kusy z jedné zpracované dávky se mohou vyskytnout určité rozdíly. Kvalitativní třídění se proto doporučuje provádět až po ukončení procesu acetylace (Dinwoodie, 2000).

Ke zlepšení celkové účinnosti acetylace lze v závěrečné fázi využít mikrovlnný ohřev. Zkrátí se tím reakční časy alepší se rozložení látek v upravovaném dřevě. Závěrečné zvýšení teploty až na 150 °C nebo vytvoření podtlaku na konci procesu acetylace pomáhá k odstranění všech nezreagovaných chemikálií ve formě organických par (Rowel 1991, Larsson 2000). Odbourání anhydridu z již nepotřebného modifikovaného dřeva je také poměrně jednoduché. Při pyrolýze acetylovaného dřeva vzniká produkt, který může opět sloužit jako základ pro výrobu kyselého anhydridu a zbylá frakce může být použita pro energetické účely (Hill 2006).

### **3.7.11 Amoniak**

Kontakt dřeva s amoniakem (čpavkem) má za následek změny vlastností chemického a fyzikálního charakteru. Především se mění odstín do tmavších tónů a přechodně se zvyšuje

deformovatelnost dřeva. Amoniak ( $\text{NH}_3$ ) je bezbarvý velmi štiplavý plyn lehčí než vzduch. Je to toxická a výbušná látka zásadité povahy. Při vdechování poškozuje sliznice. Velmi dobře se rozpouští ve vodě za vzniku zásaditého roztoku. Ke ztmavnutí dřeva dochází po poměrně krátké době. Využívá se také ke zvýšení plasticity dřeva před reliéfováním, lisováním nebo ohýbáním.

### 3.7.11.1 Úprava barvy dřeva čpavkováním

Kromě klasického způsobu úpravy barvy a odstínu dřeva pařením, lze dřevo na celém průřezu barevně modifikovat pomocí amoniaku (čpavkování). Působení čpavku se projevuje různou intenzitou změny odstínu barvy dřeva od zlatavé barvy až po tmavě hnědé odstíny. Zkušenosti ukazují, že nejlepší výsledky ve změně barvy za přítomnosti čpavku se dostávají u dřev obsahujících větší množství tříslovin. Z tohoto pohledu je z našich dřev vhodný dub, kaštanovník, akát, borovice nebo modřín. Kromě tmavšího odstínu je dřevo, které obsahuje čpavek přechodně plastičtější a má vyšší odolnost vůči biotickému poškození a ultrafialovému záření (Nečesaný 1972, Stojčev 1979). Aby nedošlo k nežádoucímu prohnutí plastifikovaného dřeva v hrani, doporučuje se po délce hraně častější proložení lištami. Také konce řeziva by měly být podloženy.

Proces modifikace dřeva za účelem změny odstínu probíhá zpravidla ve čpavkových parách v hermeticky uzavřeném reaktoru. Proložené až 65 mm tlusté desky změni odstín na celém průřezu během dvou až tří týdnů. Barevná úprava tenkých sortimentů (dých) je potom významně kratší (WTT 2015). Čpavkem (čpavkovými parami) lze modifikovat především dřeva listnatá s větším podílem tříslovin. Vlhkost dřeva lze optimalizovat předsušením přímo v samotném vzduchotěsném autoklávu. Vysoká vlhkost dřeva by mohla účinek reakce snížit. Amoniak se váže velmi dobře na vodu obsaženou v buněčných stěnách. Minimálně jednu třetinu z operačního času pracuje zařízení v konvekčním režimu při normálním tlaku prostředí. Jinak by nebyla zaručena dostatečná kvalita barevné úpravy. Po modifikaci jádrových dřev s bělí zůstává i nadále patrný barevný rozdíl, jen odstín je jak u jádra, tak u běle tmavší. Po fázi barevné úpravy následuje dosušení a odsátí par nevyužitého (reziduálního) amoniaku z prostředí i ze dřeva. Jakmile dojde k vysušení a odstranění většiny amoniaku, který se nezúčastnil chemické reakce a není pevně navázán ve struktuře dřeva, nechá se materiál ještě ve skladovacích halách před expedicí dokonale provětrat. Zbytky nezreagovaného amoniaku by se mohly uvolňovat do okolí; případně by mohly vázat z okolního prostředí vlhkost. Výhodou tohoto procesu modifikace je, že se díky částečné (přechodné) plastifikaci dřeva sníží v masivním dřevě zbytková napětí. Pevnost dřeva se prakticky nemění. Díky chemické reakci se jen nepatrně může snížit rovnovážná vlhkost. Ze struktury dřeva však musí být odstraněn všechen amoniak, který se nezúčastnil chemických reakcí. Jeho přítomnost může naopak, díky vysoké afinitě k vodě, rovnovážnou vlhkost mírně zvýšit. Značnou nevýhodou spojenou s touto úpravou je, že čpavek a jeho páry způsobují korozi železných částí výrobních zařízení (Stojčev 1979, Weigl 2007, Schindler 2012). Nerezavějící provedení výrobních zařízení je proto nezbytnou podmínkou.

Vzhledem k tomu, že čpavek je prchavá, dráždivá a výbušná látka, je vhodné uskutečnit modifikaci barvy pomocí čpavku (amoniaku) ve speciálním hermeticky uzavřeném zařízení. K tomuto účelu se z hlediska konstrukce uplatní zařízení velmi podobné tradiční vakuové sušárně řeziva v nerezavějícím provedení. Dalším důvodem pro použití je malá kapacita takového zařízení, která vyhovuje občasným specifickým požadavkům na množství. Vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně nebezpečnou chemickou látku, musí být dodržovány všechny odpovídající zásady bezpečnosti práce. Po odstranění zbylého čpavku, který se neúčastnil chemické reakce se dřevem, je modifikované dřevo považováno za zdravotně nezávadné.

Tato technologie je vhodná pro úpravu dých i masivního dřeva (WTT). Výsledný produkt nachází uplatnění především při výrobě masivního nábytku, interiérových doplňků i drobných předmětů. Pro zajímavý odstín se používá i na nášlapné vrstvy plovoucích podlah. Čpavkované dřevo se na první pohled může podobat poměrně vzácnému subfosilnímu dřevu, které má stáří až několik tisíc let (Kolář 2010). V prodeji se „čpavkované“ dřevo občas objevuje pod názvem „bahenní dub“ nebo „zakouřené dřevo“. Modifikované dřevo má výrazně tmavší odstín, přecházející od zlatavé až po tmavě hnědou barvu především podle druhu modifikovaného dřeva.

#### 3.7.11.2 Přechodná plastifikace dřeva čpavkovaním

V 60. a 70. letech 20. století byl u nás zkoumán vliv plynného amoniaku na množství dusíku navázaného do struktury dřeva a na velikost podílu vodou rozpustných látek obsažených v bukovém dřevě (Nečesaný 1972). Pochopení vlivu plynného amoniaku na dřevo mělo za cíl vývoj nových postupů a optimalizaci technologických podmínek různých procesů pro modifikaci dřeva amoniakem - čpavkování (Stojčev 1979).

Bylo zjištěno, že díky působení amoniaku a změně části celulózy na amorfní se snižuje polymerizační stupeň celulózy. U hemicelulóz se aktivují jejich polární skupiny. Amoniak částečně odbourává nízkomolekulární cukry, pektiny, alkoholy, taniny a snižuje počet acetylových skupin. Naopak zvyšuje obsah dusíku a složek dřeva rozpustných ve vodě. Působení amoniaku tak může mírně snížit hustotu dřeva, redukovat velikost tangenciálního sesychání (bobtnání) a podle některých autorů dokonce způsobit mírné zvýšení rovnovážné vlhkosti (Weigel 2007).

Ověření výsledků výzkumu s ohledem na uvedené požadavky proběhlo v provozních podmínkách výroby ohýbaného nábytku. Plynným amoniakem byly po dobu šesti hodin za tlaku 0,6 MPa plastifikovány bukové hranolky o průřezu 25 mm × 25 mm a vlhkosti 14 až 20 %. Po odstranění amoniaku se vzorky navlhčily na 23 až 25 %. Potom byly hranolky opracovány do válcovitého tvaru. Následný ohyb dílců se prováděl za studena. Z výsledků experimentu vyplynula zajímavá zjištění. Asi o 4 % se snížila zmetkovitost ohýbaných dílců. Snížila se spotřeba tepla potřebného při paření dřeva. Výrobní zařízení na výrobu čpavkovaných hranolků je však velmi nákladné, zejména z důvodu nutnosti výroby zařízení z nerezavějící oceli. Amoniak reaguje s železnými částmi konstrukce. Komplikovaná jsou i související bezpečnostní opatření. V důsledku ztmavnutí dřeva není tento způsob plastifikace vhodný pro výrobky v přírodním provedení. Díky posouzení všech uvedených faktorů se využití amoniaku ve výrobě ohýbaného nábytku nijak významně neuplatnilo. Přes všechna uvedená negativa se použití amoniaku při zpracování dřeva nakonec využívalo při výrobě lisovaného dřeva technologií Lignamon, ražbě mělkých reliéfů do plochy a při barevné úpravě dřeva (Nečesaný 1972, Dejmal 2001, Dejmal 2013).

### 3.8 Tepelná modifikace dřeva

V důsledku zvyšování teploty dřeva v rozmezí přibližně od 160 do 260 °C v prostředí inertní atmosféry (dusík, vodní pára, olej, podtlak) dochází k jeho částečné hydrolýze. To má za následek snížení (odbourání) počtu volných (reaktivních) OH skupin. V důsledku chemických reakcí, které ve dřevě v těchto podmínkách probíhají, dochází v rámci hlavních stavebních složek ke snížení obsahu kyslíku a vodíku a nárůstu obsahu uhlíku.

Už v roce 1937 byl zkoumán vliv vysoké teploty na změny v chemické struktuře dřeva, který vedl ke zvýšení jeho hydrofobnosti. Pevnost dřeva se však významně zhoršila (Stamm 1964). Po roce 1946 experimenty pokračovaly a bylo patentováno teplem (termicky) upravené dřevo (Staybwood). Materiál se vyznačoval především vysokou rozměrovou stabilitou. V roce 1951 (Runkel 1951) už hovoří o dvou fázích procesu tepelné úpravy: hydrolýze a kondenzaci, týkající se především pentózanů. V dalších letech probíhal výzkum na různých dřevech při

různých teplotách a časech a jejich vlivu na vlastnosti modifikovaného dřeva (Rusche 1973). V roce 1965 byl Melcerovou proveden experiment, při kterém byl sledován průběh chemických změn u bukového dřeva zatěžovaného teplotami až do 160 °C během 28 dní (Melcer 1990, Viitanen 1994). Další práce se zabývaly vlivem tepelné úpravy na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, odolností vůči houbám a hmyzu a zdravotní nezávadností modifikovaného materiálu. Následně byly vyvíjeny a laboratorně zkoumány různé postupy tepelné úpravy dřeva (Kačík 1992, Viitaniemi 1996, Rapp 2000, Viitaniemi 2001, Teischinger 2002, Hill 2006).

Teprve situace na trhu se dřevem na přelomu tisíciletí si však vynutila přejít od převážně experimentální fáze do fáze realizační. Přibližně od roku 2000 se na trhu s dřevařskými produkty objevila celá řada komerčních materiálů na bázi tepelně upraveného dřeva se sníženou rovnovážnou vlhkostí. Protože při výše uvedených vysokých teplotách může dojít ke vznícení dřeva, bylo vyvinuto několik postupů, které využívají různé možnosti jak tomu zabránit. Pro výrobu byla zkonstruována zcela nová zařízení, zajišťující požadované podmínky úpravy v inertní atmosféře (ECWM 2003, Tjeerdsma 2005, Wang 2005, Metsä-Kortelainen 2006). Reakci probíhající za velmi vysokých teplot lze v poslední fázi považovat za exotermickou. Zjištěné reakční teploty uvnitř teplem modifikovaného materiálu totiž o několik stupňů Celsia přesáhly teplotu přehřáté vodní páry, v níž se úprava dřeva odehrávala (Čermák 2013). Jako optimální se jeví využití teplem upraveného dřeva zejména ve stavebnictví na obklady a terasové profily do exteriéru, případně do interiéru sportovních hal a bazénů se zvýšenou vlhkostí prostředí. Velmi dobré uplatnění je na stavebně truhlářské výrobky (okna a dveře) (TWA 2003).

Tepelně lze modifikovat všechna dřeva. Chemické změny podrobně popsali např. (Tjeerdsma 1998, Reinprecht 2011). V první fázi procesu dochází k rozkladu hemicelulózy za vzniku kyseliny uhličitě a kyseliny octové. Ta se další katalýzou štěpí na uhlovodíky. Degradace kyselou katalýzou má za následek vznik formaldehydu a dalších aldehydů, právě tak jako i částečné štěpení ligninu. Tyto reakce mohou nepříznivě ovlivňovat vlastnosti dřeva. Již v první fázi lignin kondenzuje při odštěpení kladného náboje benzenu a tvoří methylenové můstky. Na aromatickém jádře ligninu se zvyšuje počet volných reaktivních poloh. Ve druhé fázi procesu tepelné úpravy se kondenzace ligninu ustálí vytvořením methylenových můstků, spojujících aromatická jádra. Zpětnou reakci má na svědomí aldehydická skupina vytvořená v první etapě s ligninem. Tato fáze má na vlastnosti dřeva méně nepříznivé účinky. Naopak dochází při ní k růstu počtu vazeb mezi řetězci a tím následně ke zlepšení rozměrové stálosti dřeva. V závěru procesu (při klimatizaci) dochází k esterifikaci (reakce alkoholu a kyseliny za vzniku esteru a vody). Pomocí infračervené spektroskopie (FTIR analýza) byl indikován specifický ester karbonyl. V tepelně zpracovaném dřevě se tento ester váže na lignin a vytváří ustálené karbonylové skupiny. Celkovým výsledkem tepelné modifikace je, že upravené dřevo má menší počet reaktivních OH skupin než dřevo neupravené (nižší rovnovážná vlhkost dřeva), a že v něm vznikly nové látky, především na bázi aromatických uhlovodíků, které jsou účinné proti působení dřevokazných hub a hmyzu (Weiland 2003, Follrich 2006, Yildiz 2007, Reinprecht 2011).

Esteves a Pereirová (2009) popsali tepelnou modifikaci dřeva jako deacetylaci, depolymerizaci a dehydrataci hemicelulóz; zvýšení podílu krystalické celulózy; strukturálními změnami, tvorbou volných molekul, kondenzačními reakcemi a příčným spojováním v oblasti ligninu; emisemi VOC látek a tvorbou nových sloučenin v oblasti extraktivních látek dřeva. Esterifikace přispívá ke snížení hydroskopicity dřeva, následkem čehož se zvyšuje rozměrová stabilita a trvanlivost. Během procesu se ze dřeva vlivem vysokých teplot odpaří část prchavých látek. V průběhu tepelné modifikace se naopak mohou vytvořit uvnitř dřeva nové látky, především dřevný dehet, což naopak zvyšuje biologickou odolnost i odolnost vůči vodě.



Dřevný dehet (kreosot) se skládá především z guajakolu, kreosolu, o-kresolu, 4-ethylguajakolu a z rostlinných fenolů (aromatické látky).

Dřevo jako přírodní „kompozit“ složený z dřevních buněk má cíleně změněné vlastnosti v důsledku vystavení teplotám zpravidla vyšším jak 160 °C v prostředí se sníženým obsahem kyslíku. Inertní atmosférou může být vodní pára, dusík, olej nebo podtlak. Výsledný materiál (teplem modifikované masivní dřevo) má trvale změněné vlastnosti zpravidla na celém průřezu. U tepelně ošetřených materiálů na bázi dřeva dochází podle použité teploty a délky trvání procesu k určité změně mechanických vlastností. Částečně se sníží modul pružnosti a přerážecí práce. Současně bylo ale standardními metodami zjištěno zvýšení tvrdosti modifikovaného dřeva. Významné snížení rovnovážné vlhkosti tepelně upraveného dřeva má za následek eliminaci rozměrových změn v souvislosti s nižším příjmem vlhkosti. Experimentálně bylo prokázáno, že po tepelném zpracování se u všech zkoumaných dřev zvýšila odolnost proti dřevokazným houbám. Vysoká odolnost byla zejména proti houbám rozkládajícím celulózu. Ukázalo se, že odolnost upraveného dřeva je závislá především na modifikační teplotě a čase zušlechťování. Vlastní tepelná úprava je poměrně krátká a podle rozměrů a počáteční vlhkosti dřeva probíhá v řádu hodin. Například nejznámější materiál Thermowood, který prošel teplenou úpravou při 190 °C bývá uváděn jako Thermo-S (rozměrově stabilní). Masivní dřevo, které prošlo teplenou úpravou při 212 °C bylo označeno jako Thermo-D (biologicky odolný) (TWA 2003, Metsä-Kortelainen 2006, Tausch 2011).

V porovnání s neupraveným dřevem má tepelně modifikované řezivo tyto zásadní trvalé změny ve vlastnostech: zvýšená rozměrová stabilita, zvýšená hydrofobnost, zlepšená odolnost proti dřevokazným houbám a částečná změna barvy a vůně. V důsledku tepelné modifikace se sníží rovnovážná vlhkost dřeva. Z důvodu možného snížení ohybové pevnosti u tepelně ošetřeného dřeva je nutno při jeho používání dodržovat evropské a národní standardy. Vlastnosti tepelně ošetřeného řeziva jsou závislé na druhu dřeva, použité technologii a parametrech procesu v jeho jednotlivých fázích (čas a teplota). Změny v akustických vlastnostech mohou být zajímavé pro výrobce hudebních nástrojů. Testy také jasně prokázaly zvýšenou odolnost tepelně modifikovaného dřeva vůči hmyzu. Uvádí se, že pro člověka je materiál při běžném používání zdravotně nezávadný (TWA 2003, Sernek 2004, Reinprecht 2011, Čermák 2013).

Technologie průmyslové výroby teplem upraveného dřeva jsou obvykle charakterizovány snížením koncentrace kyslíku v okolí dřeva během vlastní úpravy. V současnosti uplatňované procesy využívají jako ochrannou atmosféru především:

- vodní páru,
- vakuum,
- inertní plyn,
- olej.

Nevýhodou úpravy dřeva v oleji (OHT – Oil Heat Treatment) je částečné znečištění povrchu a případný zápach oleje. Naopak výhodou je o něco větší ohybová pevnost ve srovnání s úpravou ve vodní páře. Proto se takto upravený materiál používá především pro venkovní účely. Ostatní tepelně upravené dřevo může být použito jak pro vnitřní, tak pro vnější podmínky. Většinou bývá dodáváno ve formě profilovaných polotovarů, které je možno délkově upravovat. Materiál je vhodný pro podlahy, vnější a vnitřní obklady, okna, dveře, nábytek a další truhlářské výrobky pro místa s vyšší relativní vlhkostí prostředí. V případě použití na mechanicky zatížené prvky musí být postupováno podle příslušných standardů. Použití na nosné prvky se nedoporučuje.

Tepelně upravené řezivo je podle současné evropské normy z roku 2008 děleno do jednotlivých specifických tříd (ČSN P CEN/TS 15679 49 0644). Třída 1 je určena pro suché

podmínky a je charakterizována rovnovážnou vlhkostí, která odpovídá teplotě 20 °C a relativní vlhkosti okolí 65 % po dobu několika týdnů v roce. Používá se pro případy, kdy je dřevo nebo výrobky na jeho bázi plně chráněno před počasím a vlhkostí. Třída 2 pro vlhké podmínky je charakterizována obsahem vlhkosti, který odpovídá teplotě 20 °C a relativní vlhkosti okolí 85 % po dobu několika týdnů v roce. Třída 2 se používá tehdy, když jsou dřevo a výrobky na jeho bázi plně chráněny před povětrností a vlhkostí, ale vysoká okolní vlhkost může vést k občasnému přechodnému zvýšení vlhkosti. Třída 3 pro venkovní podmínky je charakterizována vyšší vlhkostí než platilo pro třídu 2. Třída 3 se používá pro případy, kdy nejsou dřevo ani výrobky na jeho bázi chráněny před povětrností a vlhkostí, ale nejsou v přímém styku se zemí. Dřevo je buďto kontinuálně vystaveno působení povětrnosti nebo je chráněno, ale je často zvlhčováno. Třída 4 pro venkovní podmínky se používá pro případy, kdy nejsou dřevo ani výrobky na jeho bázi chráněny před povětrností a vlhkostí a jsou trvale v kontaktu se zemí. Používá se tam, kde je dřevo nebo produkty na jeho bázi v kontaktu s půdou nebo vodou a je trvale zvlhčováno. Třída 5 se používá tam, kde je modifikované dřevo trvale vystaveno působení slané vody.

Konstrukce zařízení pro výrobu dřeva modifikovaného vysokými teplotami závisí především na typu inertní atmosféry, na druhu a počáteční vlhkosti dřeva. U většiny postupů je materiál během úpravy na jednom místě, existují i zařízení, kdy se materiál během úpravy pohybuje v průchozím tunelu (Lunawood,). Některé procesy probíhají v jednom zařízení (Thermowood, Thermoholz, Menzholz), u jiných je v průběhu úpravy použito několik různých zařízení (Platowood). Zařízení jsou zpravidla v nerezovém provedení, vzduchotěsná, tepelně izolovaná. Výrobní cyklus je tak sofistikovaný, že jsou k energetickým účelům využity i některé odpadní látky, které by jinak tvořily nežádoucí emise. Ve většině evropských států s vyspělým dřevozpracujícím průmyslem jsou vyvinuta vlastní technologická zařízení i výrobní postupy na úpravu vlastností dřeva pomocí vysokých teplot. Podle dostupných údajů se za poslední desetiletí výrobní kapacita i produkce tepelně upraveného dřeva několikanásobně zvýšila (Raap 2001, Teischinger 2002, Hill 2006). Tyto v současnosti komerčně úspěšné materiály se staly dostupnými a jsou běžně používány zejména ve stavebnictví, jako materiál určený především do exteriéru. Dále se uplatňuje například jako obklad v saunách, krytých bazénech, sportovních halách, ale i při výrobě kvalitního nábytku do interiéru, případně při výrobě hudebních nástrojů (Rowel 2005, Tjeerdsma 2005, Dejmal 2013).

### **3.9 Biologická modifikace dřeva**

V případě, že za určitých podmínek dojde ke kontaktu buněčné stěny dřeva s hyfami dřevokazných hub nebo některými bakteriemi, má dřevo určitou schopnost, jak působení jejich enzymů částečně odolávat. Může to být dáno vyšší tvrdostí buněčných stěn, potenciálem vodíku (pH), přítomností fytoncidů - vosků a pryskyřic, tříslovin, karbolových kyselin a dalších látek zvyšujících přirozenou odolnost dřeva. Pokud však trvají podmínky vhodné k rozvoji hub nebo činnosti bakterií delší dobu, k určité destrukci dřeva nakonec zpravidla dojde. Proces enzymatického působení houby je většinou koncentrován do terminálních buněk hyf, kde dochází k vylučování konkrétních enzymů. Hyfa (houbovitě vlákno) může narušit buněčnou stěnu dřeva v podstatě třemi způsoby. Nejčastějším způsobem je, že hyfa rozleptá buněčnou stěnu nebo její část pomocí extracelulárních enzymů. Druhým možným způsobem je narušení buněčné stěny pomocí osmotického tlaku. Tlak vzniklý v důsledku rozdílné koncentrace osmoticky aktivních látek v částečně propustné struktuře dřeva může dosahovat až 5 MPa. Třetí možností napadení dřeva houbou je kombinace obou výše uvedených faktorů (Horský 1987, Bajer 1983, Reinprecht 1992). Základní stavební složky dřeva jsou v přírodě enzymy napadány v různé míře. Největšímu rozkladu většinou podléhají nejméně odolné hemicelulózy. Více odolná je potom krystalická celulóza. Poměrně

odolnou složkou je v tomto případě lignin, i když i ten bývá nakonec terčem působení dřevokazných hub.

Destruktivní účinek působení enzymů dřevokazných hub nebo bakterií však lze v některých případech využít i v pozitivním smyslu. Tím není míněna vcelku kladně vnímaná jejich rozkladná činnost v přírodě, ale jejich záměrné využití k určité požadované změně vlastností dřeva. Ukazuje se, že existují možnosti jak využít působení enzymů bakterií a hub pozitivně v oblasti zpracování dřeva. Jednou z forem řízené biologické úpravy dřeva je enzymatická modifikace (Pánek 2008, Schwarze 2012). Enzymatická modifikace dřeva je chápána především jako záměrné využití enzymů k narušení či změně struktury (vlastností) nebo barvy dřeva. Může tak dojít k narušení buněčné stěny do určitého stádia nebo stupně, což způsobí požadovanou změnu fyzikálních, mechanických či estetických vlastností. Pro úpravu vlastností dřeva jsou nejvhodnější takové houby a bakterie, které produkují specifické enzymy typu hydroláz (xylanáza) a při tom svou činností prakticky nepoškozují strukturu buněčné stěny, ale jen její specifickou oblast, například ztenčeniny nebo parenchymatické buňky obsahující pektiny. Tyto hydrolázy (bílkoviny) jsou v malém množství schopny výrazně urychlit (katalyzovat) průběh biochemické reakce se dřevem. Jedná se například o zvýšení propustnosti dřeva při impregnaci, částečné rozvláknění, odbourání některé z hlavních stavebních složek dřeva (lignin), změna počtu reaktivních (volných) hydroxylových skupin či změna mechanických vlastností masivního dřeva. Ukazuje se však, že mezi hlavní úkoly spojené s mykologickou úpravou dřeva stále patří nalezení vhodných kultur, rovnoměrné působení enzymů v rámci dřevní struktury a včasné ukončení procesu rozkladu dřeva. Princip využití enzymů pro zvýšení propustnosti dřeva je založen na kultivaci a rozrůstání mycelia houby na povrchu dřeva a následném enzymatickém rozpouštění (napadání) dřeva především ztenčenin a parenchymatických buněk dřeva za optimálních vnějších podmínek. Největší produkce enzymů je na koncích hyf.

K biologické úpravě dřeva za účelem zvýšení propustnosti těžko impregnovatelných dřev lze použít specifické druhy hub hnědého tlení. Houby musí produkovat takové hydrolázové enzymy, které budou schopny narušovat strukturu dvojteček, bez toho aby poškozovaly strukturu buněčné stěny. Zkoumány byly například houby rodu *Trichoderma* vzhledem k jejich již známému vlivu na změnu propustnosti dřeva. Pro specifickou barevnou úpravu dřeva existuje možnost využití vlivu dřevozbarvujících hub, které ke svému působení využívají zásobní látky obsažené v parenchymatických buňkách dřeva. Bylo zjištěno, že rozsah kolonizace dřeva houbami na povrchu koreluje následně s hloubkou průniku impregnační látky dřevní strukturou (Pánek 2008, Schwarze 2012).

Dřevo také obsahuje látky (peptidy, minerály, dusíkaté složky), které mohou sloužit jako zdroj obživy pro některé bakterie. Naopak terpenoidy a třísloviny jejich činnost omezují. Některé bakterie - aerobní ke své činnosti potřebují kyslík, jiné jsou schopné žít i bez přítomnosti kyslíku - anaerobní. Druhou skupinu tvoří například bakterie působící ve dřevě ponořeném v nesterilní vodě (vodní nádrže, bazény, archeologické dřevo). Samotné mycelium sice neprorůstá do dřeva, ale jím produkované enzymy jsou následně schopny rozkládat dřevo do hloubky až několika centimetrů.

Za zmínku stojí také příklad, kdy nastal u některých výrobců nedostatek kvalitního dřeva pro výrobu tužek (cedr, vejmutovka, lípa). Z toho důvodu došlo v bývalé NDR k založení výzkumu cíleného působení dřevokazných hub na některá tuzemská dřeva (buk). Cílem bylo dosažení požadovaných vlastností (dostatečná pevnost a snadné ořezávání), pomocí biologické modifikace (Horský 1987).

Také při výrobě buničiny se jeví z ekologických i energetických důvodů zajímavé využití některých druhů hub bílého tlení (*Ceriporiopsis subvermispota*). U nich je však nutné přesně sledovat stádium rozkladu a jejich činnost včas zastavit, aby nedošlo k nežádoucímu narušení ostatních stavebních složek dřeva. Při experimentech tato houba bílého tlení působila na

vzorky smrkového dřeva při teplotě 30 °C a 30% relativní vlhkosti vzduchu po dobu 15 a 30 dní (Lang 2009). Výsledky experimentů ukazují, že při degradaci dřeva dochází v důsledku působení uvedené houby k významnému snížení obsahu ligninu, což může mít vliv na zkrácení času várky štěpek a snížení obsahu ligninu v odpadních vodách, vznikajících při výrobě buničiny. Současně bylo zaznamenáno zvýšení propustnosti dřeva v axiálním směru, což je zajímavé zjištění z pohledu lepší impregnace smrkového dřeva.

### 3.10 Šlechtění lesa a genové inženýrství

#### 3.10.1 Šlechtění lesa

Šlechtění lesních dřevin může mít ve svém důsledku značný vliv na vlastnosti dřeva. V současnosti je šlechtění lesních dřevin metodicky orientováno především na studium, záchranu a využívání zdrojových populací kvalitních lesních dřevin, rozvoj tzv. semenných sadů lesních dřevin a testy potomstev, vegetativní množení lesních dřevin konvenčním řízkováním a explantátovými kulturami „*in vitro*“ současně s klonovými testy, hybridizaci lesních dřevin, využití genových markerů a aplikaci genetického inženýrství.

Cílem šlechtění lesních dřevin, s ohledem na zpracování dřeva, může být zvyšování produkce kvalitního dřeva jako strategické obnovitelné suroviny, zvyšování jakosti dřeva, zvyšování odolnosti lesních dřevin vůči biotickým faktorům (sníh a námraza, sucho, mráz), škůdcům (hmyz), chorobám (houby, bakterie), způsobujícím výrazné zhoršení kvality a snížení využití dřeva. To všechno za podmínky zachování současných cenných genových zdrojů a genetické variability lesních dřevin v našich lesích (Paule 1992, Koblíha 2001, Koblíha 2002, MZČR 2010).

Které lokální populace a porosty budou použity jako zdrojové pro určitý šlechtitelský program, záleží na fenotypovém šetření, provenienčním výzkumu a příslušném genovém markeru. Obecně lze uvést, že touto zdrojovou populací by měla být populace adaptovaná. To znamená, že to může být populace původní, ale v řadě případů už to je i populace nepůvodní (introdukovaná).

Semenné sady představují jednu z možných metod prakticky orientovaného šlechtění lesních dřevin. Postup jejich zakládání spočívá v selekci výběrových stromů a jejich soustřeďování (v

podmínkách naší republiky převážně klonových potomstev, do sadu). Semenné sady jsou nejen reprodukčními výsadbami, ale zároveň šlechtitelskými populacemi. Cílem zřizování semenných sadů není pouze maximální produkce semen, ale také dosažení vysoké genetické kvality osiva. V ČR je v současné době založeno asi 130 semenných sadů, o celkové výměře 349,96 ha. Je v nich zastoupeno 9 jehličnatých a 13 listnatých dřevin. Jehličnany tvoří 87,4 % a listnáče 12,6 % z celkové výměry. Pro producenta sazenic je důležité, aby věděl, ze kterého sadu může nakoupit osivo pro oblast, kterou chce zásobovat sazenicemi. Vlastníka lesa pak tento údaj informuje, ze kterého semenného sadu jsou sazenice pro jeho lesní majetek vhodné (Rambousek 2000).

Ve vybraných zdrojových populacích se na základě fenotypového šetření provádí individuální selekce rodičovských stromů. Tyto stromy jsou často využívány především pro heterovegetativní množení roubováním a pro zakládání klonových semenných sadů. Většina semenných sadů lesních dřevin ve světě a prakticky všechny na území České republiky jsou sady klonové. Důvodem toho, že většina semenných sadů u nás jsou sady klonové je skutečnost, že nástup kvetení a plodnosti většiny lesních dřevin je až v pozdním věku stromů.

Naopak v případě vegetativního množení se zachovává nejen genetická identita, ale i dosažené stádium vývoje množení stromu. Tím je dán i podstatně dřívější nástup úrody

v klonových semenných sadech obsahujících rodičovské stromy rozmnožené vegetativně, většinou roubováním, než by tomu bylo u semenných sadů založených ze sazenic semenného původu. Díky zachování genetické identity v klonovém semenném sadu je selekční efekt mnohem vyšší než v případě použití semenných potomstev výběrových stromů.

Semenné sady 1. generace jsou založené z rodičovských stromů, pocházejících pouze z fenotypové selekce, tedy geneticky neověřených testy potomstev. Semenné sady 2. generace se zakládají z již ověřených klonů. V těchto případech už bylo použito roubování a řízkování pro rozmnožení rodičovských stromů. V jižních státech USA v případě jižních druhů borovic již přistoupili k využívání semenných sadů 3. generace. Velmi důležitou otázkou je počet klonů, tj. vegetativně rozmnožených rodičovských stromů v semenných sadech. Tento problém má dva důležité aspekty. Jedním je případné nežádoucí zúžení genetické variability. Druhým je otázka systému páření v takové syntetické populaci, jakou klonový semenný sad je. Při testování potomstev selektovaných stromů jsou velké naděje vkládány do tzv. časných testů, které umožňují předpovídat budoucí růstové vlastnosti stromu již ve stádiu semenáčků či dokonce semen. Výhodou těchto testů je podstatné snížení doby trvání šlechtitelského cyklu v rámci šlechtitelských programů.

Při šlechtění lesa se používají různé šlechtitelské metody. Především se jedná o selekci, která je založena na výběru rodičovských stromů. Nebo to může být hybridizace neboli křížení mezi těmito šlechtitelskými stromy reprodukovanými v rámci semenného sadu. Hybrid je potom produktem užitého křížení. Při tom je nutné minimalizovat možnost nežádoucího sprášení daného druhu lesní dřeviny uplatněním určité izolace. Díky využití skleníkových semenných sadů mohla být hybridizace na bázi kontrolovaného opylení zavedena do lesnické praxe ještě ve větším měřítku (Kobliha 2000).

Hybridizační experimenty s lesními dřevinami se sice uskutečnily již v 19. století. Hybrid (kříženec) je výsledkem šlechtitelského postupu. Avšak teprve s rozvojem semenných sadů lesních dřevin a zvláště za přispění skleníkových semenných sadů mohla být hybridizace na bázi kontrolovaného opylení zavedena do běžné lesnické praxe. Ve skleníku nebo fóliovníku jsou hybridy umístěny ve fenologicky příhodném období. Tímto obdobím je především čas diferenciacce pupenů na vegetativní a generativní (Kováč 1995).

S rostoucím významem vegetativního množení lesních dřevin na bázi konvenčního řízkování a výhledově stále více na bázi kultur *in vitro* (ve zkumavce), je třeba počítat i s určitým podílem klonového hospodářství v lesnické praxi. Klonování může sehrát významnou úlohu v záchraně a rozšíření cenných genotypů a ve využití výsledků šlechtění (klonování stromů tradičně selektovaných, hybridních, mutantních i geneticky transformovaných). Pro výzkum jsou z listnatých dřevin vhodné hybridní topoly. Z jehličnatých dřevin se „*in vitro*“ relativně snadno regenerují modříny.

V souvislosti s klonováním lesních dřevin stojí za zmínku tzv. somatická embryogeneze. Pomocí technologie *in vitro* mikropropagace se lesní dřeviny se v širším rozsahu podařilo šířit až v osmdesátých letech 20. století. Somatická embryogeneze je jednou z metod explantátových kultur *in vitro* a pro jehličnaté dřeviny se jeví jako poměrně účinná. Somatická embryogeneze je charakterizována vznikem embryí z buněk těla rostliny. Explanátová kultura představuje izolované rostlinné orgány, pletiva nebo buňky pěstované metodou *in vitro*. V první fázi dochází k indukci embryogenního pletiva, posléze k tvorbě somatických embryí. Tato somatická embrya lze kultivovat standardně v *in vitro* podmínkách v celistvé rostlince. Ve vhodných podmínkách je možné indukovat morfogenetické procesy i u terminálně diferencovaných buněk a regenerovat tak plnohodnotně vyvinuté a životaschopné rostliny. Jako zajímavý se v současnosti jeví využití somatických embryí pro tvorbu tzv. umělých semen. Tento postup spočívá v obalení somatických embryí speciálním gelem, který nahrazuje semenné obaly. Díky tomu lze tato „umělá semena“ tradičně vysévat v lesních školkách podobně, jako semena běžná. V přirozených podmínkách somatická

embryogeneze není častá. Somatická embryogeneze představuje alternativní způsob vegetativního množení rostlin. Tato metoda může významně přispět k úspěšnému uskutečnění zalesňovacích programů, ke zlepšení stavu lesních společenstev a usnadnění návratu ohrožených, vzácných genotypů zpět do původního prostředí. Současně umožňuje množení jedinců s vybranými vlastnostmi (kvalita, množství dřeva, rezistence vůči biotické a abiotické zátěži apod.) (Mauleová 2007, Korecký 2011).

Tak jak roste v případě semenných sadů význam testů potomstev, je v případě vegetativního množení důležitá realizace klonových testů pro ověřování genetické kvality takto získaného materiálu. Ve vyhledání a využívání zdrojových populací hrají dnes významnou roli v oblasti pěstování lesa vedle standardně prováděných fenotypových šetření a klasického provenienčního výzkumu také genové markery – specifické znaky vázané na geny. Při genetických studiích jsou už tradičně využívány izoenzymy a dnes již také analýza DNA. Zjištěné genové markery se využívají pro různé populační studie. Současně je zde patrná tendence používat je i pro šlechtitelské aplikace. Sem lze zařadit ověřování geografického a genetického původu porostů a stromů, ověřování úrovně genetické diverzity zdrojových populací a identifikaci konkrétních projevů hospodářsky významných znaků a vlastností.

### **3.10.2 Genové inženýrství**

Moderní biotechnologické postupy, které zahrnují i genetické inženýrství představují v současnosti nové alternativy ve šlechtění lesních dřevin. Genové (genetické) inženýrství představuje přímý zásah člověka do genomu organismu pomocí moderních DNA technologií. Ve smyslu přímého zásahu do struktury DNA se využívá od 70. let 20. století. Metoda zahrnuje zavádění cizích genů, jako nositelů určitých vlastností, do daného organismu. U geneticky modifikovaných rostlin byl změněn dědičný materiál (DNA) pomocí genových technologií. Jedná se o moderní šlechtitelské metody (genové inženýrství) z oblasti biotechnologií, které využívají v přírodě probíhající procesy. Mezi cíle genetického inženýrství v oblasti lesního hospodářství může patřit vyšší tolerance stromů na herbicidy a skleníkové plyny, odolnost vůči mrazu, hmyzu a patogenům, vyšší reprodukční kapacita, změny reprodukčního cyklu, úprava ligninu, urychlení růstu nebo změny ve struktuře dřeva (Kobliha 2003, Mauleová 2007, Malá 2012).

Hospodářský přínos produkce transgenních dřevin může být velký pro společnost a pro lesní hospodářství i dřevozpracující průmysl. Ale také environmentální přínos může být důležitý díky redukci herbicidů a pesticidů pomocí zavedení transgenních dřevin tolerantních k herbicidům a odolných proti hmyzu a patogenům. Zvýšením produkce dřeva pomocí genového inženýrství mohou být redukovány potřeby těžby přirozených lesů. Příkladem oblasti zpracování dřeva, kde existuje značný zájem na úpravě vlastností (změna složení ligninu ve dřevě), může být průmyslové odvětví výroby papíru a celulózy. Vzhledem k tomu, že proces oddělování ligninu během výroby je energeticky a finančně vysoce náročný, je úprava obsahu ligninu v rostoucím stromě jedním z možných cílů genového inženýrství. Lignin se z jehličnatého dřeva při výrobě extrahuje podstatně hůře než ze dřeva listnatého. Je proto důležitým cílem snížení obsahu ligninu a změna ve složení ligninu blíže k ligninu listnatých dřevin. Podobně důležitým problémem je i dosažení vyšší odolnosti dřeva vůči působení biologických škůdců pomocí genetických manipulací. Jedná se však o problematiku vysoce citlivou. Špatný odhad zavedení konečných výsledků výzkumu do praxe by mohl způsobit v přírodě jen těžko předvídatelné škody. Existuje totiž teoretická možnost úniku transgenních rostlin do přírody a jejich neřízené šíření (Trnková 2014).

## 4 Závěr

Způsoby modifikace vlastností dřeva, které tento text zmiňuje jsou částečně řazeny podle toho, jak se začaly postupně při úpravě dřeva historicky uplatňovat. S tím souvisí i jejich rostoucí složitost a komplikovanost. Vědci a výzkumníci potřebují neustále větší množství informací, náročnější přístroje i interdisciplinární spolupráci. V současnosti je většina způsobů modifikace dřeva spojena s moderními sofistikovanými zařízeními. Tato zařízení mohla vzniknout jen díky dokonalému laboratornímu a poloprovoznímu odzkoušení nových materiálů na bázi modifikovaného masivního dřeva. To může v současnosti vést ke korekcím v některých tradičních postupech, případně k vývoji nových postupů a materiálů na bázi modifikovaného rostlého dřeva. To v důsledku směřuje k efektivnějšímu využití dřeva. Nové materiály potom poskytují lepší možnosti při jejich aplikaci, jiná konstrukční a architektonická řešení výrobků ze dřeva. Výzkum se v poslední době zaměřuje i na možné kombinace různých způsobů modifikace. Ukazuje se, že i v této oblasti bude nutné modifikovat jednotlivé vlastnosti dřeva „na zakázku“ podle potřeb zpracovatelů a konečných uživatelů modifikovaného dřeva. Jak je vidět na množství, odborných publikací, na počtu mezinárodních konferencí, ale i patentů zapsaných v posledních dvaceti letech, je oblast modifikace vlastností dřeva věnována ve většině vyspělých států značná pozornost.

Úprava vlhkosti dřeva sušením byla v minulosti a jak je vidět dnes, bude i v budoucnosti jedním z nejdůležitějších způsobů jak šetrně a poměrně snadno ovlivnit mechanické a fyzikální vlastnosti a biologickou odolnost dřeva. Většina uvedených způsobů sušení je známá již poměrně dlouho. Díky tomu se potvrdila oprávněnost jejich použití v praxi a podle toho se různě uplatnily v jednotlivých oblastech zpracování dřeva. V současnosti se u výrobců sušáren řeší problematika zvyšování kapacity jednotlivých zařízení a optimalizace procesu. I nadále hlavním cílem zůstává vysoká kvalita sušení, při snižování operačního času a nákladů na energie. Správně vysušené řezivo je základem pro výrobu kvalitních výrobků. Proto je třeba dokonale znát vlhkost dřeva, která je vyžadována při jeho dalším zpracování a použití. Kvalitně vysušené dřevo s odpovídající vlhkostí se lépe obrábí, spojuje lepidly, dýhuje i povrchově dokončuje. Zvyšuje se jeho pevnost. Kvalitně sušit neznamená mít k dispozici jen kvalitní sušárnu řeziva, ale je třeba znát vlastnosti a stavbu jednotlivých dřev a ovládat teorii sušení v různých typech zařízení při různých podmínkách. Rychlá reakce na změny parametrů materiálu, změnami parametrů sušicího prostředí v procesu sušení se potom projevuje snížením spotřeby energií a času sušení. Moderní zařízení mající vysokou výkonnost, vyžadují, aby byl materiál ještě před vlastním sušením dokonale připraven. To se týká především předsušení a následného dosušení ve speciálních zařízeních (kombinované sušení). Jedině tak lze maximálně využít kapacitu například u sušení v přehřáté páře nebo s využitím mikrovln.

Kromě úpravy vlastností dřeva pomocí sušení existuje v současnosti celá řada jiných způsobů jak změnit vlastnosti dřeva na přechodnou dobu nebo trvale. Zde je patrná snaha o snížení spotřeby fungicidních a insekticidních látek, které v minulosti v kombinaci se dřevem enormě zatěžovaly životní prostředí. Snaha specialistů, pracujících v této oblasti, byla korunována na přelomu tisíciletí úspěšným vývojem řady materiálů na bázi modifikovaného dřeva. Jedná se především o úpravu dřeva na úrovni buněčné stěny. Použité chemické látky reagují se dřevem a snižují počet volných vazebných míst. Díky tomu dojde ke snížení rovnovážné vlhkosti dřeva. Takto upravené dřevo má potom vyšší rozměrovou stabilitu i zvýšenou odolnost vůči napadení dřevokaznými houbami. Současně se tak může snížit spotřeba jedovatých látek používaných ke klasické chemické ochraně dřeva. Ke snížení počtu volných hydroxilových skupin v rámci buněčné stěny vede i úprava dřeva vysokými teplotami. Masivní dřevo upravené v inertní atmosféře při teplotě okolo 200 °C má také sníženou rovnovážnou vlhkost. Díky chemickým procesům (suchá destilace), které se při této úpravě ve dřevě odehrají dojde

i ke zvýšení obsahu aromatických látek, což má také pozitivní vliv na zvýšení odolnosti proti napadení dřevokaznými houbami a hmyzem. Zlepšené vlastnosti však mohou v tomto případě znamenat mírné zhoršení pevnosti dřeva v ohybu. Všechny materiály u nichž došlo zejména ke snížení rovnovážné vlhkosti zle úspěšně uplatnit na obklady, podlahy a stavebnětruhlářské výrobky do vlhkého prostředí v interiéru (sauny, bazény) a především do exteriéru (fasády, terasy, pergoly). Vyšší hydrofobnosti dřeva lze také dosáhnout impregnací oleji a vosky. V současnosti se stále častěji impregnuje dřevo přírodními oleji pomocí tlakové impregnace. Pro zvýšení tvrdosti dřeva se používá především impregnace sacharidy, pryskyřicemi, případně kombinací pryskyřit, olejů či vosků. Tvrdost dřeva lze zvýšit také lisováním plastifikovaného dřeva v příčném směru. Slisované dřevo však má tendenci více bobtnat, proto je tato úprava kombinována s vysokoteplotní modifikací dřeva, která zajistí vyšší rozměrovou stabilitu slisovaného dřeva. Kromě plastifikace dřeva pomocí hydrotermické úpravy lze plastifikovat dřevo v chemických látkách (čpavek). Vyšší plastičnosti dřeva lze dosáhnout pomocí slisování ve směru rovnoběžném s dřevními vlákny. V tomto případě se ale jedná o způsob který byl vyvinutý téměř před sto lety a dosud nebyl překonán.

Na vývoji nových materiálů a technologií se neustále pracuje. Příkladem toho je zkoumání možnosti využití enzymů hub nebo bakterií při úpravě vlastností dřeva (proustnost). Nebo změna vlastností dřeva pomocí šlechtění lesa, případně se může jednat o stále více diskutované využití genového inženýrství v této oblasti. Požadavky výrobců i aktuální změny na trhu se dřevem budou i nadále vyvolávat otázky jak upravovat vlastnosti masivního dřeva.



## 5 Použitá literatura

1. European Conference on Wood Modification. Gent, Belgie, 2003
  2. European Conference on Wood Modification. Göttingen, Německo, 2005
  3. European Conference on Wood Modification. Bangor, October 2007, Cardiff, Wales. s. 209–212. ISBN: 184-220-096-8
  4. European Conference on Wood Modification. Stockholm, Švédsko, 2009
  5. European Conference on Wood Modification. Riga, Lotyšsko, 2010
  6. European Conference on Wood Modification. Lublaň, Slovinsko, 2012
  7. European Conference on Wood Modification. Lisabon, Portugalsko, 2014
- 
1. European Conference on Wood Modification (2003). Gent, Belgie. 2003
  2. European Conference on Wood Modification (2005). Göttingen, Německo. 2005
  3. European conference on Wood modification (2007). Bangor, October 2007, Cardiff, Wales. s. 209–212. ISBN: 184-220-096-8
  6. Internationale European Drying Group (EDG) – Trocknungskonferenz (1994): Trocknungsqualität eine Herausforderung für die Zukunft. Bundesforschungsanstalt für Forst und Holzwirtschaft, Hamburg 1994
- Action E15, 13–14 October 1999, Edinburgh, Germany 1999
- Antuková, V., Kučerová, I. (2014): Vliv anorganických sloučenin používaných k ochraně dřeva na celulosu. *Koroze a ochrana materiálu* 58(2), Výzkumné články, VŠCHT Praha, s. 36–42
- Almkvist, G., Persson, I. (2008): Degradation of polyethylene glycol and hemicellulose in the Vasa. *Holzforschung*, 62(2), 2008, s. 64–70
- Application No. US Patent No. 7.404.422 (2008)
- Avramidis, G., Tebe, B., Nothnick, E., Militz, H., Viöl, W., Wolkenhauer, A. (2010): Wood Vented Modification by Atmospheric Pressure Plasma Treatment for Improved Absorption Characteristics. In: Hill CAS, Militz H, Andersons B (Hg.) 5. European Conference on Wood Modification (ECWM), Riga 2010, s. 365–372
- Baar, J., Gryc, V. (2010): Colour of tropical wood and discolouration due to simulated sunlight. *Acta univ. agric. etsilvic. Mendel. Brun.*, 2010, LVIII, č. 5, s. 13–20
- Babiak, M. (1990): Wood-water systém. Zvolen, VŠLD 1990, vedecké a pedagogické aktuality 4(1990), 63 s.
- Babiak, M., Čunderlík, I., Kúdela, J. (1990): Permeability and structure of beech wood. IAWA – IUFRO. Wood Anatomy Symposium, Zúrich 1990, (IAWA bulletin, 11/1990, č.2, s.115
- Babiak, M., Lagaňa, R., Makovíny, I. (2000): Sušenie agátového dreva mikrovlným ohrevom (Drying black locust wood with microwave heating). Interakcia dreva s rôznymi formami energie = Interaction of wood with various forms of energy. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2000, s. 25-28. ISBN 80-228-0975-6
- Bajer, J., Peklík, V. (1983): Ochrana dřeva v bytech, chatách a chalupách. SNTL, Praha 1983
- Beckers, E. P. J., Militz, H. (1994): Acetylation of solid wood. Initial trials on lab and semi industrial scale. Second Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium, Vancouver Canada, s. 125–135
- Bekioui, N., Hakam, A., Zoulalian, A., Sesbou, A., El Kortbi, M. (2010): Solar drying of pine lumber. IAWS/ESTB7 meeting, Maroco 2010

- Bente, M., Avramidis, G., Förster, E., Rohwer, E. G., Viöl, W. (2004): Wood surface modification in dielectric barrier discharges at atmospheric pressure for creating water repellent characteristics. *European Journal of Wood and Wood Products* (2004)62, s.157–163
- Blažek, Z. (2007): *Struktura a vlastnosti komprimovaného bukového dřeva*. Diplomová práce, Mendelu, 2007
- Blomberg, J. (2006): *Mechanical and physical properties of semi-isostatically densified wood* (doctoral thesis). Lulea University of Technology, LTU Skeleftea, 2006, 61 s. ISSN 1402-1544
- Boonstra, M. J., Blomberg, J. (2007): Semi-isostatic densification of heat-treated radiata pine. Springer-Verlag 2007. *Wood Sci Technol* 41 (2007) s. 607–617 DOI 10.1007/s00226-007-0140-y
- Brabec, M., Tippner, J., Dejmal, A., Rademacher, P. (2013): Investigation of Hydrothermal Plasticization Process with Convective and Dielectric Heating. *Pro Ligno*. 2013. sv. 9, č. 4, s. 670-678. ISSN 1841-4737
- Building Research Establishment (BRE) (2005): Client report number 222 – 189 Information paper for the Indurite process for the adding of density to UK grown timber species Building Research Establishment Ltd 2005
- Brown, W. H. (1957): High temperature drying. *Timber Technol. and Mach. Woodworking* 65(1957), s. 93–94
- Brunner-Hildebrand (2014): <http://www.brunner-hildebrand.de>
- Bučko, J. (1997): *Chemické spracúvanie dreva*, ES TU Zvolen, 1997, 322 s.
- Bučko, J., Geffert, A. (1991): *Chemické spracovanie dreva*, ES VŠLD Zvolen, 1991, 169 s.
- Bučko, J., Osvald, A.: *Rozklad dreva teplom a ohňom*. TU vo Zvolene, 1997, 100 s.
- Bučko, J., Šutý, L., Košík, M. (1988): *Chemické spracovanie dreva*, ALFA Bratislava, 1988, 311 s.
- Castwall, L., Lindhe, C. (1993): CaLignum® in 1993
- Castwall, L., Lindhe, C. (1998): A method of producing impregnated wooden products. Patent AU 1996048519, 11.6.1998
- COST Action E22 (2004): *Environmental Optimisation of Wood Protection*. Proceedings of the Final Conference, 22-23 March 2004, Estoril Portugal. COST Office, EUR-OP, 2006, 260 s. ISBN 9289800348, 9789289800341
- Čermák, P., Horáček, P., Rademacher, P. (2013): Measured temperature and moisture profiles during thermal modification of beech (*Fagus sylvatica* L.) and spruce (*Picea abies* L. Karst.) wood. *Holzforchung* 08(2013), 68(2), s.175–183. DOI 10.1515/hf-2013-0047
- ČSN 49 0650 (1994) *Uskladňování pilařských výrobků pro přirozené sušení*. ČNI, Praha 1994
- ČSN EN 13183-1 (49 1016) (2002) *Vlhkost vzorku řeziva – Část 1: Stanovení váhovou metodou*. ČNI, Praha 2002
- ČSN EN 13183-2 (49 1016) (2002) *Vlhkost vzorku řeziva – Část 2: Odhad elektrickou odporovou metodou*. ČNI, Praha 2002
- ČSN EN 13183-3 (49 1016) (2005) *Vlhkost vzorku řeziva – Část 3: Odhad kapacitní metodou*. ČNI, Praha 2005
- ČSN EN 14298 (49 1110) (2005) *Řezivo – Stanovení kvality sušení*. ČNI, Praha 2005
- ČSN EN 15228 *Konstrukční dřevo - Konstrukční dřevo impregnované proti biologickému napadení*. Česká technická norma (ČSN) 2009
- ČSN EN ISO 14040 (01 0940) *Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Zásady a osnova*. ČNI Praha, 2006
- ČSN P CEN/TS 12169 (49 1202) (2008) *Kritéria pro stanovení shody dávky řeziva*. ČNI, Praha 2008
- ČSN P CEN/TS 15679 (49 0644) (2008) *Tepelně upravené dřevo – Definice a charakteristiky*. ČNI, Praha 2008

- ČSN P ENV 14464 (49 0646) (2003) Řezivo – Metoda stanovení zkornatění. ČNI, Praha 2003
- Darrel, D. N. (1973): Wood Deterioration and Its Prevention by Preservative Treatments. Syracuse University Press, 1973, 380 s.
- Dejmal, A. (1995): Základy hydrotermické úpravy a ochrany dřeva. Skriptum MZLU v Brně, Brno 1995, 192 s. ISBN 80-7157-163-3
- Dejmal, A. (2001): Osobní komunikace. Ing. Josef Dostál, Lignachem, a.s., Brno, 2001
- Dejmal, A. (2002): Osobní komunikace s Ing. Janem Berákem, Befi. Voděrady, 2002
- Dejmal, A. (2004): Osobní komunikace s Dr. Johannesem Welligem, Bundesforschungsanstalt für Forst und Holzwirtschaft. Hamburg, 2004
- Dejmal, A. (2005): Osobní komunikace s Dr. Johannesem Welligem, Bundesforschungsanstalt für Forst und Holzwirtschaft. Göttingen 2005
- Dejmal, A. (2008): Osobní komunikace s Ing. Karlem Slimáčkem, Katres. Jihlava, 2008
- Dejmal, A. (2013): Osobní komunikace s Ing. Karlem Slimáčkem, Katres. Jihlava, 2013
- Dejmal, A. (2013): Osobní komunikace. Ing. Pavel Černý, Lignamon. cz. s.r.o. Praha, 2013
- Dejmal, A. (2014): Osobní komunikace s prof. Dr. Alfredem Teischingerem, Universität für Bodenkultur Wien. Brno 2014
- Dejmal, A. (2014): Osobní komunikace s prof. Dr. Holgerem Militzem, Universita Göttingen. Brno 2014
- Dejmal, A. (2014): Osobní komunikace s Dipl Ing. Robertem Widmannem, EMPA, Brno 2014
- Dejmal, A. a kol. (2012): Automatizované zařízení pro vakuově tlakovou impregnaci porézních materiálů. UV č. 23438. ÚPV, Praha 2012
- Dejmal, A., Merenda, L., Zejda, J. (2013): Způsob tepelné modifikace dřeva, zejména dřeva slisovaného smrkového. Pat. č. 304 026, ÚPV Praha, 2013
- Dejmal, A., Rybníček, M. (2011): Problematika sušení a datování výdřevy středověké studny z náměstí Svobody. Muzeum města Brna, Forum Brunense 2011, ISBN 978-80-86549-96-5
- Dejmal, A., Šrajer, J., Hrázský, J. (2009): Měření hustotního profilu nerovnoměrně lisovaného dřeva osiky obecné pomocí přístroje X-RAY DENSE-LAB. Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2009, LVII, No. 5, s. 71–77. ISSN 1211-8516
- Dinwoodie, J.M. (2000): Timber: Its nature and behaviour. E. and F.N. Spon, London, UK, 2nd Edition.
- Dömény, J., Koiš, V., Pařil, P. (2013): Impregnability of european beech false heart wood after microwave treatment, *Pro Ligno*. 2013. sv. 9, č. 4, s. 190-194. ISSN 1841-4737. URL: <http://www.proligno.ro/en/index.htm>
- Drahoš, V., Viktorin, Z. (1996): Sušení řeziva. Scientific Pedagogical Publishing, České Budějovice, 1996, 201 s.
- Favot, P. (1986): EP 0197674 A1 Process for densifying low density woods.
- Esteves B., Pereira H. (2009): Heat treatment of wood. *Bioresources* 2009 4(1), s. 370-404.
- Esteves, B., Nunes, L., Pereira, H. (2011): Properties of furfurylated wood (*Pinus pinaster*). *Eur. J. Wood Prod.* (2011) 69, s. 521–525. DOI 10.1007/s00107-010-0480-4
- European Conference on Wood Modification (ECWM). Gent 2003
- FAO (2009): IPPC standard ISPM 15. Regulation of Wood Packaging Material in International Trade
- Finish ThermoWood Association (TWA) (2003): ThermoWood Handbook. Oy, P.O. Box 284, Snellmaninkatu 13, FIN-00171 Helsinki, Finland 2003
- Follrich, J., Miller, U., Gindl, W. (2006): Effects of thermal modification on the adhesion between spruce wood (*Picea abies* Karst.) and a thermoplastic polymer. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2006 - Springer

Forest Products Laboratory (FPL) (1991): Dry Kiln Operator's Manual. USDA Forest Service, Madison, Wisconsin, USA 1991

Forest Products Laboratory (FPL) (1999): Wood handbook - Wood as an engineering material. USDA, Forest Service, Madison, Wisconsin, USA, 1999. 463 s.

Forest Products Laboratory (FPL) (2010): Wood handbook - Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 s.

Fuchs, W. (1928): Acetylation of pine wood. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 61B, s. 948–51

Gabrielli, C., Kamke, F. A. (2008): Treatment of chemically modified wood with VTC process to improve dimensional stability. *USDA, Forest products journal* 2008

Gabrielli, C., Kamke, F. A. (2010): Phenol-formaldehyde impregnation of densified wood for improved dimensional stability. *Wood Science Technology* 2010. 44(1), s. 95–104

Gandelová, L., Šlezingerová, J., Horáček, P. (2002): Stavba dřeva. Brno Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno 2002, 176 s. ISBN: 80-7157-577-1

Gindl, W., Zargar-Yaghubi, F., Wimmer, R. (2003): Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin. *Bioresour. Technol.* 87, s. 325–330

Goldstein, I. S., Dreher, W. A. (1960): Stable furfuryl alcohol impregnating solutions. *Ind. & Eng. Chem. Res.* 52(1), s. 57–58

Göthe, S., Lindström, O., Lough-Grimsgaard, K., Sjöberg, E. (2013): Composition and method for treating wood. Calignum Technologies AB. Patent No: US 8,372,519, B2, Feb. 12, 2013

Gräfe F., Künzelmann U., Reinhard G. (1989): Examination of the influence of vapour phase inhibitors on the wettability of the iron surface by contact angle measurements. *Werkstoffe und Korrosion* 40, s. 437–440

Halaj, M., Geffert, A., Pernická, M. (2001): Interakcia dreva s oxidačnoredukčnými činidlami počas hydrotermickej úpravy. 1. vyd, slovensky, Technická univerzita vo Zvolene. Vedecké štúdie, B, 3(2001), Zvolen 2001, 76 s. ISBN 8022810630

Haller, P., Wehsener, J. (2004): Festigkeitsuntersuchungen an Fichtenpressholz (FPH). *Holz als Roh- und Werkstoff*, European Journal of Wood and Wood Products, Springer-Verlag 2004. 10.1007/s00107-004-0516-8

Hamilton, D. L. (1999): Methods of conserving archaeological material from underwater sites. File 6: Wood conservation, College Station 1999, <http://nautarch.tamu.edu/class/anth605/File6.htm> [přístup 8.7.2007].

Hill, C. A. S. (2006): Wood Modification - Chemical, Thermal and Other Processes John Wiley & Sons, 2006, 239 s. ISBN 0-470-02172-1 978-0-470-02172-9

Holland C. (2005): Information paper for the Indurite process for the adding of density to UK grown timber species. Forestry Commission, client report number 222 – 189 [http://www.forestry.gov.uk/pdf/cr\\_InformationPaper.pdf/\\$FILE/cr\\_InformationPaper.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/cr_InformationPaper.pdf/$FILE/cr_InformationPaper.pdf)

Homan, W. J., Jorissen, A. J. M. (2004): Wood modification developments. *HERON*, Vol. 49, No. 4 (2004) <http://heronjournal.nl/49-4/5.pdf>

Hong-Hai L, Qing-Wen W, Lin Y, Tao J, Ying-Chun C (2005): Modification of larch wood by intensive microwave irradiation. *Journal of Forestry Research* 16 (3), s. 237–240

Horáček, P. (2008): Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. MZLU v Brně, Brno 2008, 124 s. ISBN: 978-80-7375-169-2

Horský, D. (1987): Hydrotermická úprava a ochrana dřeva, část „Ochrana dřeva“. VŠLD Zvolen, 1987, 272 s.  
<http://eagri.cz/public/web/mze/zemedelstvi/gmo-geneticky-modifikovane-organismy/>  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/%28SICI%291096->  
<http://www.accoya.com/>  
<http://www.bendywood.info> [cit. 1999-12-10]

<http://www.bfafh.de/inst4/43/pdf/4protect.pdf>  
<http://www.biotech.kth.se/woodbiotechnology/enzymology.html> - 12k  
<http://www.calignum.com>> [cit. 1999-12-10]  
<http://www.cnymys.org/newsletters/fg-9-12.htm>  
<http://www.codesmiths.com/shed/workshop/techniques/oakfuming/>  
<http://www.compwood-products.com>> [cit. 1999-12-10]  
<http://www.dep.fmph.uniba.sk/mambo/index.php?option=content&task=view&id=264>  
<http://www.docstoc.com/docs/26185307/Belmadur%C2%AE-Wood-Harder-than-oak--durable-like-teak>  
[http://www.empa.ch/plugin/template/empa/731/\\*/--/l=2](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/731/*/--/l=2)  
<http://www.experts123.com/q/what-is-osmose-indurite-enhanced-timber.html>  
[http://www.forestry.gov.uk/pdf/cr\\_InformationPaper.pdf/\\$FILE/cr\\_InformationPaper.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/cr_InformationPaper.pdf/$FILE/cr_InformationPaper.pdf)  
<http://www.forestry.ubc.ca/brchline/95dec/page3.html> - 7k  
<http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all~content=a907734822>>.  
<http://www.kebony.com/en/>  
<http://www.natwood.at/>  
<http://www.ott.doe.gov/biofuels/enzymatic.html> - 31k  
<http://www.sciencedaily.com/releases/2012/09/120908081611.htm>  
[http://www.trademarkify.com.au/trademark/646744?i=INDURITE-Wood\\_Hardening\\_Technologies\\_Limited](http://www.trademarkify.com.au/trademark/646744?i=INDURITE-Wood_Hardening_Technologies_Limited) (Australian Trademark No. 646744)  
<http://www.veda.muni.cz/veda-a-vyzkum/2074-nova-laborator-umozni-prumyslove-vyuziti-plazmove-tuzky>  
<http://www.voedsel.net/verslag/enzymatic.doc>  
<http://www.woodmodification-network.org>  
<http://www.woodmodification-network.org/newsletters/docs/ChemistryAspect.pdf>  
[http://www.woodweb.com/Resources/wood\\_eng\\_handbook/wood\\_handbook\\_fpl\\_2010.pdf](http://www.woodweb.com/Resources/wood_eng_handbook/wood_handbook_fpl_2010.pdf)  
[http://www.woodweb.com/Resources/wood\\_eng\\_handbook/wood\\_handbook\\_fpl\\_2010.pdf](http://www.woodweb.com/Resources/wood_eng_handbook/wood_handbook_fpl_2010.pdf)  
[http://www.woodwisdom.fi/Pics/tiivistelma\\_engl.pdf](http://www.woodwisdom.fi/Pics/tiivistelma_engl.pdf)  
[http://www.wtt-english.com/WTT\\_Verfahren.asp](http://www.wtt-english.com/WTT_Verfahren.asp)  
<https://www.bre.co.uk/>  
<https://www.bre.co.uk/page.jsp?id=1931>  
 Charles, R., Frihart, R. (2004): Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, Ed. R.M. Rowell, CRC Press, Chap.9, s. 215-278  
 Chuchrjanskij, P. N. (1953): Zušlacht'ovanie dreva, časť „Lisovanie dreva“. Práca, Bratislava, 1953, 155 s.  
 Janák, K., Král, P. (2004): Technologie I, Pro studijní obor Nábytkářství. Informatorium, 2004, 208 s. ISBN: 978-80-7333-003-3  
 Jirů, P. (1959): Vysoušení řeziva. SNTL, Praha 1959, 263 s.  
 Joščák, T., Krause, A., Treu, A., Militz, H. (2006): Determination of moisture content of resin modified wood. Wood research 51(4), s. 37 – 46.  
 Kačík, F. (1997): Vplyv teploty a vlhkosti na zmeny sacharidov dreva. Vedecké štúdie, 4/1997/A, TU vo Zvolene, 1997, 69 s.  
 Kačík, F., Melcer, I., Melcerová, A. (1992): Vergleichende Charakteristik einer hydrothermischen und thermischen Behandlung von Buchenholz. Holz Roh Werkst. 50, s. 79–84  
 Kafka, E. (1989): Dřevařská příručka: Část 1. SNTL, Praha 1989, 1. vyd. 483 s.. ISBN: 8003000092  
 Kamke, F. A. (2006): Densified radiata pine for structural composites. Maderas. Ciencia y tecnologia, 2006, 8(2), s. 83–92

- Kamke, F. A., Sizemore, H. (2008): Viscoelastic thermal compression (VTC) of wood. Viscoelastic Thermal Compression of Wood. U.S. Patent No. 7,404,422 B2. July 29, 2008.
- Kamke, F. A., Kutnar, A. (2011): Influence of stress level on compression deformation of
- Keylwerth, R. (1952): Hochtemperatur-Trockenanlagen. Holz als Roh- und Werkstoff, 1952, 10 (4), s. 134-138
- Keey, R. B., Langrish, T. A. G. and Walker, J.C.F. (2000): Kiln-Drying of Lumber. Springer Verlag, Berlin 2000, 326 s.
- Khater, H. A., Helwa, N. H., Enayet, M. M., Hashish, M. I. (2004): Optimization of Solar Kiln for Drying Wood. Drying Technology 22, č. 4. s. 677–701
- Kivader, M., Klement, I. (2012): Stanovenie vlhkosti smrekového dreva v procese vysokoteplotného sušenia. ACTA FACULTATIS XYLOLOGIAE, 51(1), s. 25–32, Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene 2012
- Klement I., Marko, P. (2008): Zmena farby bukového dreva v procese sušenia. Technická univerzita vo Zvolene, Acta facultatis xylologiae, roč. 50, č. 1 (2008), s. 47–53
- Klement, I. (1995): Mikrovlnné sušenie dreva. Nové poznatky konvekčného sušenia dreva. TU Zvolen, 1995, s. 77–87
- Klíma, M., Janča, J., Kapička, V., Slavíček, P., Saul, P. (2000): Patent. Číslo: CZ 286310. Vydavatel: Úřad průmyslového vlastnictví
- Klíma, M., Janča, J., Kapička, V., Slavíček, P., Saul, P. (2005): Das Verfahren zur erzeugung einer physikalisch und chemisch aktiven Umgebung durch einen Plasmastrahl und Plasmastrahl dazu. Masarykova univerzita. Patent. Číslo: AT 300857. Vydavatel: Evropský patentový úřad. Místo vydání: Rakousko 2005
- Kobliha, J. (2000): Explantátové kultury – historický předěl pro rozvoj klonového hospodářství lesních dřevin. Lesnická práce, 79 2000, 6, s. 272–273
- Kobliha, J. (2001): Použití osiva ze semenných sadů lesních dřevin. Lesu zdar, zvláštní vydání, Genetika 2001, červen 2001, s. 7 – 8
- Kobliha, J. (2003): Genetické inženýrství a lesní dřeviny. In: Biologická rozmanitost a otázky biologické bezpečnosti. Ministerstvo životního prostředí, 2003, s. 26–30
- Kobliha, J., Janeček, V. (2003): Šlechtění lesních dřevin ve Švédsku. Lesnická práce, 82 2003, 8, s. 25–27
- Kolář, T., Rybníček, M. (2010): Results of Research into Subfossil Oak Trunks from the Morava Basin. WorldDendro 2010. Abstracts of The 8th International Conference on Dendrochronology. 1. vyd. Rovaniemi: Finnish Forest Research Institute (Metla), 2010, s. 198. ISBN 978-951-40-2235-7
- Kollmann F. F. P. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Springer Verlag 1951
- Kollmann, F. (1961): Vysokoteplotní sušení, vývoj, aplikace a zkušenosti v Německu. Forest Products Journal, 1961.
- Kollmann, F. F. P. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Springer Verlag 1951
- Korecký, J., Vítámvás, J. (2011): Somatic embryogenesis of the hybrid *Abies cilicica* × *Abies cephalonica*. *Journal of Forest Science*, 2011, roč. 57, č 9, s. 401-408. ISSN 1212-4834
- Kováč, J. (1995): Explantátové kultury rostlin 1. přeprac. vyd, česky, Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, 1995, 140 s. ISBN 8070674938
- Král, P., Hrázský, J. (1999): Výroba dých a překližkových materiálů. 1.vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno 1999, 142 s. ISBN 80-7157-358-2
- Krečetov, I. (1954): Vysoušení dřeva. 1.vyd. Praha: SNTL, 1954, 507 s.
- Kruml, J. (1964): Obsluha sušáren řeziva. SNTL Praha 1964, 211 s.
- Kubín, J., Hospodárik, A., Ledvina, M. (1975): Modifikácia dreva termosetmi. Výskumná správa 18/75, ŠDVÚ, Bratislava 1975

- Kúdela, J., Rešetka, M. (2013): Influence of pressing parameters on dimensional stability and selected properties of beech wood. II. Density profile and hardness. *Acta Facultatis Xylogologiae* 2013. 55(1), s. 41–49
- Kumar, S. (1994): Chemical modification of wood. *Wood and Fiber Science*, 1994(26) (2), s. 270–280
- Kuriál, P. (2002): *Technologie II. – Restaurování nábytku a dřevěných výrobků. Střední a vyšší odborná škola uměleckých řemesel, Brno, 2002, 227 s.*
- Kurjatko, S., Mamoň, M. (1997): Bezkontaktná metóda merania rozmerových zmien dreva (Non-contact method for wood dimensional changes measurement.). *Les - drevo - životné prostredie* 97. Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene, Zvolen 1997, s. 153–158
- Kurjatko, S., Reinprecht, L. (1993): Transport látok v dreve. *Vedecké a pedagogické aktuality* č.7, TU Zvolen, 1993, 110 s.
- Kutnar, A., Kamke, F. A., Sernek, M. (2008): Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood. *Wood Science and Technology* 2008(43), s. 57–68
- Kutnar, A., Humar, M., Kamke, F.A., Sernek, M. (2008): The mechanical properties of densified VTC.  
[http://www.tara.tcd.ie/bitstream/handle/2262/55854/PEER\\_stage2\\_10.1007%252Fs00107-010-0432-z.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.tara.tcd.ie/bitstream/handle/2262/55854/PEER_stage2_10.1007%252Fs00107-010-0432-z.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Lang, R. (2009): Chemické zmeny smrekového dreva upraveného hubou *Ceriporiopsis subvermispora* a ich vplyv na odváranie buničín. Dizertačná práca. Zvolen: 2009. 95s.
- Larsson, P., Simonson, R., Bergman, O., Nilsson, T. (2000): Resistance of acetylated wood to biological degradation. *Holz als Roh und Werkstoff* 58, s. 331–337
- Lesar, B., Gorišek, Ž., Humar, M. (2009): Sorption Properties of Wood Impregnated with Boron Compounds, Sodium Chloride and Glucose. *IDrying Technology* [online]. Slovenia : University of Ljubljana, 2009 [cit. 2011-04-14]. Dostupné z WWW:
- Li X., Zhang B., Li W., Li Y. (2005): Research on the effect of microwave pretreatment on moisture diffusion coefficient of wood. Springer-Verlag 2005. Received: 15 January 2005
- Linde, C., Castwall, L. (1997): Process for producing hard elements of wood. U.S. Patent No. 5,678,618
- Luth, H. J.; Krupnick, S. R. (1945): Method and apparatus for drying lumber. U.S. Patent 2,387,595. U.S. Patent Office, Washington DC 1945.
- Lysý, F., Jirů P. (1961): *Nauka o dřevě. Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1961, 758 s.*
- Makovíny, I. (1987): Elektrofyzikálne vlastnosti dreva. *Vedecké a pedagogické aktuality*. TU Zvolen 1987, 109 s.
- Malá, J., Máchová, P., Cvrčková, H., Šíma, P. (2012): *Biotechnologie v lesním hospodářství a šlechtění. Lesnická práce, červenec 2012*
- Martínek, Z. (2009): Vlastnosti dřeva modifikovaného křemičitany. Diplomová práce, Mendelu, Brno 2009, 91 s.
- Mathewson, J. S.: High temperature drying: its application to the drying of lumber. *Forest Prod.* 1954. J. 4(5), s. 276–279.
- Matovič, A. (1993): Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva. ES VŠZ Brno 1993, 212 s.
- Mauleová, M. (2007): Použití *in vitro* metod pro zachování genových zdrojů vybraných druhů lesních stromů. Disertační práce, CZU Praha 2007
- Mauleová, M., Vítámvás, J. (2007): Differential success of somatic embryogenesis in random gene pool of Norway spruce. *Journal of Forest Science*, 2007, roč. 53, č. 2, s. 74 - 87. ISSN 1212-4834.

- Megnis, M., Olsson, T., Varna, J., Lindberg, H. (2002): Mechanical performance of linseed oil impregnated pine as correlated to the take-up level. *Wood Science and Technology* 2002 Vol: 36(1), s. 1-18. DOI: 10.1007/s002260100120
- Melcer I., Melcerová A., Kačík F., Šindler J., Vargicová K., Smrtič V. (1990): Zmeny vlastností bukového dreva po jeho termickom spracovaní. *Drevo*, 1990, 45. s. 255–260
- Melcer, I., Melcerová, A., Solár, R., Kačík, F. (1989): Chemizmus hydrotermickej úpravy listnatých drevín. *Vedecké a pedagogické aktuality, ES VŠLD Zvolen* 1989, 71 s.
- Merenda, L., Dejmal, A., Nikl, K. (2013): Způsob rovnoměrného plošného zhušťování dřeva, zejména smrkového. Pat. č. 304 024, ÚPV, Praha 2013
- Metsä-Kortelainen, S., Antikainen, T., Viitaniemi, P. (2006): The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce heat-treated at 170 °C, 190 °C, 210 °C, 230 °C. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64 (2006), s. 192–197
- Militz, H. (1991): The improvement of dimensional stability and durability of wood through treatment with non-catalysed acetic acid anhydride. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 49(4), s. 147–152
- Militz, H., Beckers, E.P.J., Homan, W. J. (1997): Modification of solid wood - research and practical potential. The International Research Group on Wood Preservation, Document Nr. IRG/WP 97-40098, Whistler, Canada
- Militz, H., Schaffert, S., Peters, B. C., Fitzgerald, C. J. (2011): Termite resistance of DMDHEU-treated wood. *Wood Sci. Technik*. 45, s. 547–557
- Militz, H., van Acker, J. (2000): Wood modification towards practical application. A european perspective. IUFRO World Conference, Kuala Lumpur, Malaysia 2000
- Mitchell, H. L. (1972): How PEG helps the hobbyist who works with wood. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1972, 20 s.
- Morgos, A., Iimazu, S. (1993). Comparing Conservation Methods for Waterlogged Wood Using a Sucrose, Mannitol and Their Mixture in Hoffmann, P. (ed.), *Proceedings of the 5th Triennial Meeting of ICOM Group on Wet Organic Archaeological materials Conference*, Portland, Maine.
- MZČR (2010): Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2009. MZČR, Praha 2010. ISBN 978-80-7084-941-5
- Nairn, J. A. (2005): Numerical simulations of transverse compression and densification in wood. *Material Science and Engineering*, University of Utah, Salt Lake City, UT 84112 (Received February 2005)
- Navi, P., Sandberg, D. (2012): *Thermo-Hydro-Mechanical Wood Processing*. CRC Press, Amazon. co. uk. 280
- Nečesaný, V. (1972): Modifikácia dreva amoniakom. Výskumná správa 41/72, ŠDVÚ Bratislava, 1972
- ON 12 6012 (1988) Proměňování, odevzdávání a přejímání sušáren řeziva. ÚNM, Praha 1988
- ON 49 0651 (1988) Umělé sušení řeziva. ÚNM, Praha 1988
- Osvald, A. (1983): Horenie dreva a materiálov na báze dreva. Zb. Vedeckých prác, DF VŠLD Zvolen 84 (1983). Alfa, Bratislava 1983
- Págo, L. (1989): Základy muzejní konzervace. Moravské muzeum, Brno 1989. MK ČSR 59-396-87
- Palovič, J. (1981): Technológia piliarskej výroby. VŠLD Zvolen, 1981. 230 s.
- Pánek, M., Reinprecht, L. (2008): Bio-treatment of spruce wood for improving of its permeability and soaking. Part 1: Direct treatment with the bacterium *Bacillus subtilis*. *Wood Research* (2008) 53 (2), s. 1–12
- Pánek, M., Reinprecht, L., Babiak, M. (2005): Improving of spruce wood impregnability with *Bacillus subtilis* and *Trichoderma viride*. Workshop 2005, COST Action E 37, 4.



- Pařil, P., Dejmali, A. (2012): Comparison of physical properties of poplar wood vacuum-pressure impregnated with sucrose and sodium chloride. In *Interaction of Wood with Various Forms of Energy*. 1. vyd. Zvolen, Slovakia: Technical University in Zvolen, 2012.
- Paule, L. (1992): Genetika a řl'achtenie lesn'ých drev'ın. *Přiroda*, 1992, 304 s. ISBN 80-07-00409-2
- Peleřka, K. (1963): Přirozen'ı suřen'ı řeziva. SNTL, 1.vyd'ani. Praha 1963, 210 s.
- Podgorski, L., Chevet, B., Onic, L., Merlin, A. (2000): Modification of wood wettability by plasma and corona treatments. *International Journal of Adhesion*. Elsevier 2000
- Pořgaj, A. - Chovanec, D. - Kurjatko, S. - Babiak, M. (1997): řStrukt'ura a vlastnosti dřeva. Přiroda, a.s. Bratislava, 1997, 485 s. ISBN 80-07-00960-4  
Praha 2011, 89 s. ISBN 978-80-87427-05-7  
Proceedings of COST Action E22
- Raap, A. O. (2001): Review on heat treatments of wood. COST ACTION E22 Environmental optimisation of wood protection. Proceedings of Special Semin'ar, Antibes, France 2001
- Raap, A. O., Sailer, M. (2000): Heat treatment of wood in Germany - state of the art. Bundesforschungsanstalt f'ur Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, Germany 2000  
<http://thermaltreatedwood.com/worldwide/germany.pdf>
- Rambousek, J., Nov'ak, P. (2000): Semenn'ı sady lesn'ıch dřev'ın v řesk'ı republice. Lesnick'ı pr'ace, 2000, ř. 04
- Rapp, A. O., Sailer, M., Peek, R. (2000): Innovative Holzverg'utung zur Erh'ohung der Dauerhaftigkeit. in: Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt f'ur Forst- und Holzwirtschaft Nr. 200, s. 27-34 <http://www.holzfragen.de/seiten/modifizierung.html#5>
- Reeb, J. E. (1997): *Drying Wood*. University of Kentucky, Extension Service, 1997.
- Reinprecht, L. (1992): Ochrana dřeva - N'avody na cv'ıchen'ia. TU Zvolen 1992, 90 s.
- Reinprecht, L., Reřetka, M., Makov'ıny, I. (2010): Impregnability of spruce wood after its treatment with microwaves. *ACTA FACULTATIS XYOLOGIAE ZVOLEN*, 52(2 Technick'ı univerzita vo Zvolene, Zvolen 2010), s. 43–51. ISSN 1336–3824
- Reinprecht, L., Vidholdov'ı, Z. (2011): Termodrevo - Thermowood. řm'ıra print, s.r.o.
- Reinprecht, L.: Ochrana dřeva - N'avody na cv'ıchen'ia. TU Zvolen 1992, 90 s.
- Ressel, J. B. (1999): State of the art for vacuum drying in the wood working industry. Cost
- Riehl, T., Welling, J., Fr'uhwald, A. (2002): Druckd'ampfen von Schnittholz. Bundesforschungsanst. Forst- Holzwirtschaft., Institut f'ur Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes, Hamburg 2002, 79 s. Arbeitsbericht ř. 1/02
- Rodriguez-Navaro, C., Doehne E. (1999): Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystalization pattern. In *Earth Surf. Process. Landforms* 24[online]. Los Angeles : The Getty Conservation Institute, 1999 [cit. 2011-04-11].
- Rosca, I., Bergmann, I., Tanczos, I. (2005): Penetrability of resins and polyethylene glycols in ammonia treated spruce wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* (2005) 63, s. 403–407. DOI 10.1007/s00107-005-00
- Rowell, R. M. (1983). Chemical modification of wood: A review. Commonwealth Forestry Bureau, Oxford, England, 6, s. 363–382
- Rowell, R. M. (1983): Chemical modification of wood. *Forest Product Abstract*, 1983, 6 (12), s. 363–382
- Rowell, R. M. (1991). Chemical modification of wood. In: D. N.-S. HonandN. Shiraishi, eds., Rowell, R. M. (2005). Chemical modification of wood. In: R. M. Rowell, ed.,
- Rowell, R. M. (2005): *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. University of Wisconsin, Madison, 2005. ISBN-13: 978-0521820653 ISBN-10: 0849315883  
<http://www.amazon.com/Handbook-Wood-Chemistry>
- Runkel, R. O. H., Wilke, K. D. (1951): Zur Kenntnis des thermo-plastischen Verhaltens von Holz. *Holz Roh Wokst.* 9 (1951), s. 260–270

- Rusche, H. (1973): Die Thermisch Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 200 °C. Erste Mitteilung: Festigkeitseigenschaften von Trockenem Holz Nach Thermischer Behandlung, Holz Roh Werkst, 31(1973), s. 273–281
- Seborg, R. M., Millett, M. A., Stamm A. J. (1956): Heat stabilized compressed wood (Staypak). Forest Products Laboratory, Forest Service, U. S. Department of Agriculture. Information Reviewed and Reaffirmed, No. 1580, March 1956
- Seborg, R. M., Millett, M. A., Stamm, A. J. (1962): Heat-stabilized compressed wood (Staypak). FPL, Report No. 1580 (revised), 22 s.
- Sergovskij, P. S. (1977): Hydrotermická úprava a sušenie dreva. Alfa, Bratislava 1977, 402 s.
- Sernek, M., Kamke, F. A., Glasser, W.G. (2004): Comparative analysis of inactivated wood surfaces. Holzforschung 58/2004, s. 22–31
- Shin, Y., Wang, C., Exarhos, G. J. (2005): Synthesis of SiC Ceramics by the Carbothermal Reduction of Mineralized Wood with Silica. Pacific Northwest National Laboratory is operated by Battelle Memorial Institute for the U.S. Department of Energy under contract DE-AC06-76RL0 1830. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.200400371/pdf>
- Schindler, J. (2012): Modifikace barvy dřeva teplem (Diplomová práce). Mendelova univerzita v Brně, 2012
- Schneider, M. H. (1995): New cell wall and cell lumen wood polymer composites. Wood Sci. and Tech, 29(4), s. 135-158
- Schwarze, F. (2012): Treatment With Fungi Makes a Modern Violin Sound Like a Steinmann
- D. E. (1995): Real-time simulation of solar kiln drying of timber. Solar Energy 54. č. 5, s. 309–315
- Stradivarius. Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, St. Gallen, Switzerland. Central New York Mycological Society. Julie Siler 1235 Long Road Homer, NY 13077, Science Daily Sep. 8, 2012
- Siau, J. F. (1984): Transport processes in Wood. Springer Verlag. Berlin . Heidelberg – New York 1984, 379 s.
- Simpson, W. T. (1980): Radio-frequency dielectric drying of short lengths of northern red oak. USDA Forest Service. FPL Research 1980. Paper 377.
- Sint, K. M., Adamopoulos, S., Koch, G., Hapla, F., Militz, H. (2013): Impregnation of Bombax ceiba and Bombax insignie wood with a N-methylol melamine compound. Wood Sci Technol (2013) 47, s. 43–58
- Skaar, C. (1988): Wood Water Relations. Springer Verlag, New York. 1988, 283 s.
- Skyba O., Schwarze F. W. M. R., Niemz P. (2009): Physical and mechanical properties of Thermo-Hygro-Mechanical (THM) desified wood. Wood Research 54 (2) 2009, s. 1–18
- Slaviček, P., Janča, J., Kapička, V., Brabec, A., Kadlecová, J., Smékal, P., Klíma, M. (2005): Diagnostics of rf unipolar barrier discharge generated by plasma pencil at atmospheric pressure. In XVI Symposium on Physics of Switching Arc. Brno: Faculty of Electrical Engineering and Communication, BUT, 2005. s. 170–173, s. 4. ISBN 80-214-2931-3
- Solár, R. (1997): Zmeny lignínu v procesoch hydrotermickej úpravy dreva. Vedecké štúdie, 1/7997/A, TU vo Zvolene, 1997, 57 s.
- Stamm A. J.: Wood and Cellulose Science. New York, Ronald Press Co. 1964
- Stamm, A.J., Seborg, R.M. (1941): Resin treated, laminated, compressed wood (Compreg). Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 37, s. 385–397
- Stojčev, A. (1979): Lignamon - zušlechtěné dřevo. 1.vyd. VVÚD, sv. 22/1979, Praha 1979, 98 s.
- Studhalter, B., Ozarska B., Siemon G. (2009): Temperature and moisture content behaviour in microwave heated wood prior to bending Mountain Ash (Eucalyptus regnans). European Journal of Wood and Wood Products, Springer 5(2009), s. 237–239

- Šimor, M., Rahel, J., Vojtek, P., Brabec, A., Černák, M. (2002): Atmospheric-pressure diffuse coplanar surface discharge for surface treatments. *Appl. Phys. Lett.* 81(2002), s. 2716–2718
- Šmíd, J. (2010): Úprava vlastností topolového dřeva vakuovou impregnací sacharózou. Diplomová práce, Mendělu Brno 2010
- Tarkow, H., Stamm, A. J. Erickson, E. C. O. (1946). *Acetylated wood*. Rep. 1593, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 29 s.
- Tausch, A. (2011): Pilzenresistenz von Thermoholz – Gravimetrische und mikroskopische Untersuchungen. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Februar 2011
- Teischinger, A. (2008): *Modifiziertes Holz, Eigenschaften und Märkte*. BOKU Wien, Lignovisionen 2002. ISSN 1681 - 2808
- Terziev, N., Temiz, A. (2005): Chemical modification of wood with silicon compounds. ECWM 2005, October 6-7, Göttingen, Germany.
- Tjeerdsma, B. F., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P. (1998): *Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement*. Holz als Roh- und Werkstoff, Springer 1998
- Tjeerdsma, B.F., Militz, H. (2005): Chemical changes in hydro-thermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holz Roh Werkst.* 63, s. 102–111
- Tjeerdsma, B.F., Militz, H. (2005): Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Springer 2005
- Torgovnikov, G. (1993): *Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials*, Berlin, Springer-Verlag 1993
- Torgovnikov, G. (1997): Microwave Drying of Wood Chips for Particleboard. *Microwave and High Frequency Heating*, Fermo, 9-13 September 1997, Proceedings, s. 216–219
- Torgovnikov, G., Antti, L. (1995): Microwave Heating of Wood. *International Conference on Microwave and High Frequency Heating*, 17–21 September 1995, Cambridge, U. K., Proceedings, E3.1-E3.4
- Torgovnikov, G., Vinden P.: (2005). *New Equipment for Microwave Wood Modification*. (Conference paper). September 12-15, 2005, Modena, Italy, 10 th International Conference on Microwave and High Frequency Heating, Proceedings, s. 293–297
- Torgovnikov, G., Vinden, P. (1997): Some Aspects of Microwave Application in The Forest Industry. *Microwaves: Theory and Application in Materials Processing IV 1997*, Ceramic Transactions, 80, s. 659–670
- Torgovnikov, G., Vinden, P. (2000): *New Wood Based Materials Torgvin and Vintorg*. 5th Pacific Rim Bio-Based Composite Symposium, 10-13 December 2000, Canberra Australia, Proceedings, s. 756–757
- Torgovnikov, G., Vinden, P., Mapanda, E., Cobham, P. (1999): The Application of Microwaves for Preservative Treatment of Wooden Posts. *Seventh International Conference on Microwave and High Frequency Heating*, 14-17 September 1999, Valencia, Spain, Proceedings, s. 555–558
- Torgovnikov, G., Vinden, P.: (2003). *Effect of Intensive Microwave Radiation on Wood Structure*. (Conference paper). 9 th International Conference on Microwave and High Frequency Heating, 2-5 September, Loughborough, UK, Proceedings Book, s. 501–504
- Trávník, A. (2005): *Technologické operace výroby nábytku*. Mendělova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno 2005, 178 s. ISBN 80-7157-865-7
- Trebula, P. (1989): *Hydrotermická úprava a ochrana dřeva*, část „Hydrotermická úprava dřeva“. VŠLD Zvolen 1989, 301 s.

- Trebula, P. (1989): Hydrotermická úprava a ochrana dreva, časť „Hydrotermická úprava dreva“. VŠLD Zvolen 1989, 301 s.
- Trebula, P. (1996): Sušenie a hydrotermická úprava dreva. TU Zvolen, 1996, 255 s. ISBN 80-228-0574-2
- Trebula, P. (1996): Sušenie a hydrotermická úprava dreva. TU Zvolen, 1996, 255 s. ISBN 80-228-0574-2.
- Trnková, J. (2014): Organizace a kontrola pěstování GM plodin v ČR. Ministerstvo zemědělství, odbor rostlinných komodit, Praha 2014 I. vydání
- UK Forestry Commission (UKFC) (2005): Information paper for the Indurite process for the adding of density to UK grown timber species. Client report number 222–189, BRE, UK Forestry Commission, 15 February 2005
- Vaněk, J. (1952): Ohýbaný nábytek. Průmyslové vydavatelství, Praha 1952, 107 s.
- Varga, D., van der Zee, M. E. (2008): Influence of steaming on selected wood properties of four hardwood species. Holz als Roh- und Werkstoff, February 2008, čísl. 66, vyd. 1, s. 11-18
- Viitanen, H., Jämsä, S., Paajanen, L., Viitaniemi, P. (1994): The effect of heattreatment on the properties of spruce. Apreliminaryreport. Paper prepared forthe 25th Annual Meeting, Bali, Indonesia May 29 - June 3. 1994
- Viitaniemi, P. ja Jämsä, S. (2001): Heat treatment of wood, esitelmä Puu ja Metsä 2001-messujen yhteydessä järjestetyssä seminaarissa 6.9.2001
- Vinden P., Torgovnikov G., Hann J. A. (2011): Microwave modification of Radiata pine railway sleepers for preservative treatment. Holz als Roh- und Werkstoff: European journal of wood and wood industrie, 2011(69) s. 271–279
- Vinden P., Torgovnikov G., Przewoloka, S., Hann J. A., Shaginov, A. (2007): The manufacture of solid wood composites from Microwave Modified Wood. Editor: Sper M 2007, s. 111–120
- Vinden, P., Torgovnikov, G. (2000): The Physical Manipulation of Wood Properties Using Microwave. The Future of Eucalypts for Wood Production, International Conference of IUFRO, 19-24 March 2000, Tasmania, Australia, Proceedings, 240–247
- Vodová, D., Katuščák, S., Čech, B. (1977): Nové materiály na báze dreva a syntetických polymérov. Výskumná správa č. 60/77, ŠDVÚ Bratislava 1975
- Wagenfür, R., Scheiber, Ch. (1977): Holzatlas. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1974
- Schweigruber, F. H.: Anatomy of European Woods. WSL-FNP Hauptdt, Bern, Stuttgart, 1990
- Wang, J. Y., Cooper, P. A. (2005): Effect of oil type, temperature and time on moisture properties of hot oil-treated wood. Holz als Roh- und Werkstoff, Springer-Verlag (2005) 63, s. 417–422 DOI 10.1007/s00107-005-0033-4
- Weigel, M., Pöckl, J., Müller, U., Pretzl, H., Grabner M. (2007): UV resistance of ammonia treated wood. In: Hill, CAS., Jones, D., Militz, H., Ormondroyd, GA. (Eds.), 3. European Conference on Wood Modification, BC, Bangor, UK, Third European conference on wood modification., 15th - 16th October 2007, Cardiff, s. 209–212. ISBN 184-220-096-8
- Weigl, M., Miller, U., Sommer, R., Hansmann, C. (2012): Ammonia vs. thermally modified timber—comparison of physical and mechanical properties. Eur. J. Wood Prod. (2012) s. 233–239. DOI 10.1007/s00107-011-0537-z
- Weigl, M., Pöckl, J., Müller, U., Pretzl, H., Grabner M. (2007): UV resistance of ammonia treated wood. In: Hill, CAS., Jones, D., Militz, H., Ormondroyd, GA. (Eds.), Third European Conference on Wood Modification, BC, Bangor, UK, Third European conference on wood modification., 15th - 16th October 2007, Cardiff, s. 209–212. ISBN: 184-220-096-8
- Weiland, J. J., Guyonnet, R. (2003): Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. Holz als Roh-und Werkstoff, Springer-Verlag 2003

- Welling, J. (1995): Die EDG-Richtlinie "Trocknungsqualität" - Ein neues Werkzeug für die europäische Holzwirtschaft. Holz-Zentralbl., Stuttgart 121 (1995) 2-3, s. 21–23
- Welling, J. (2010): Drying quality - an important topic for business and research. The future of quality control for wood & wood products : proceedings of the final conference of COST Action E53 ; 4 - 7th May 2010, Edinburgh, UK. Incorporating the European Wood Drying Group Workshop, s. 201–203
- Wimmer, R. (2013): Natural-fibre materials: From Ideas, to Products, to Markets. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Department for Agrobiotechnology. SWST Convention - Sunday, June 9, 2013, AT&T Conference Center, Austin, Texas
- wood in 170°C transient steam conditions. Wood Materials Sci. Engineering 2011
- wood relevant for structural composites. Holz Roh- Werkstoff 2008. 66(6), s. 446
- Yildiz, S., Gümüškaya, E. (2007): The effects of thermal modification on crystalline structure of cellulose in soft and hardwood. Elsevier, Building and Environment 2007
- Zejda, J. a kol. (2011): Solární sušárna poloskleníkového typu. UV č. 22679, ÚPV, Praha 2011
- Zemiar, J. (1999): Tvárnenie dreva ohýbaním. Technická univerzita Zvolen. Vedecké štúdie. Zvolen 1999, 69 s. ISBN 8022809306
- Zhao, H., Turner, I., Torgovnikov, G. (1998): An Experimental and Numerical Investigation of the Microwave Heating of Wood. J. of Microwave Power and E. E., 33(2), 1998, s. 121–133