

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

PEVNOSTNÍ VLASTNOSTI VRSTVENÝCH
MATERIÁLŮ NA BÁZI DŘEVA A NEDŘEVNÍCH
KOMPONENTŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program:	Dřevařství
Pracoviště (katedra/ústav):	Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Vedoucí bakalářské práce:	doc. Ing. Milan Gaff, PhD.
Konzultant bakalářské práce:	Ing. Adam Sikora

Praha 2020

Martin Kríž

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Martin Kříž

Dřevařství
Dřevařství

Název práce

Pevnostní vlastnosti vrstvených materiálů na bázi dřeva a nedřevních komponentů.

Název anglicky

Strength properties of wood-based laminates and non-wood components.

Cíle práce

Cílem práce je sumarizovat poznatky o vrstvovitých kompozitech ze dřevních a nedřevních materiálů. Zpracovat poznatky o způsobech modifikací vrstvovitých materiálů.

Metodika

1. Úvod

2. Cíle práce

- ze-sumarizovat poznatky o vrstvovitých kompozitech ze dřevních a nedřevních materiálů,
- ze-sumarizovat poznatky o způsobech modifikací vrstvovitých materiálů.

3. Analýza problematiky

- ze-sumarizovat poznatky v souladu s cílem práce. Na základě získaných poznatků analyzovat možnosti dalšího rozvoje v daném směru.

4. Přínosy a doporučení

- navrhnout nové možnosti rozvoje v oblasti rozvoje vrstvovitých materiálů.

Doporučený rozsah práce

80

Klíčová slova

kompozit, dřevní materiál, nedřevní materiál

Doporučené zdroje informací

Frese, M., and Blaß, H. J. (2006). "Characteristic bending strength of beech glulam," *Materials and Structures* 40(1), 3-13. DOI: 10.1617/s11527-006-9117-9

Gaff, M., and Gáborik, J. (2014). "Effect of cyclic loading on the elasticity of beech solid and laminated wood," *BioResources* 9(3), 4288-4296.

Gaff, M. (2009). "Process of tension in wood by embossing and their impact at surface quality," *Annals of Warsaw University of Life Sciences, Forestry and Wood Technology*, 68, 264-269.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Adam Sikora

Elektronicky schváleno dne 27. 2. 2020

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 04. 06. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Pevnostní vlastnosti vrstvených materiálů na bázi dřeva a nedřevních komponentů“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

V Praze dne 14. 6. 2020

Martin Kříž

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Milanu Gaffovi Ph.D., za trpělivost, ochotu a odborné rady, které mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Adamu Sikorovi za jeho rady a čas při praktické části bakalářské práce. V neposlední řadě musím poděkovat manželce a malému synovi za podporu při studiu.

Abstrakt

Kompozitní materiály na bázi dřeva jsou v posledních letech velmi využívaný materiál, především díky svým fyzikálním a mechanickým vlastnostem a relativně nízkým nárokům na vstupní surovinu. Zjištění co nejvíce informací o jejich vlastnostech je důležitým předpokladem pro rozšíření jejich využití.

Tato bakalářská práce se v první části zabývá v současnosti nejrozšířenějšími vrstvenými materiály na bázi dřeva, možnostmi modifikace a úpravami dřeva pro zlepšení jeho mechanických vlastností. Dále se věnuje hlavním sledovaným mechanickým parametrům, které jsou důležité při posuzování vhodnosti úpravy a modifikace dřeva. V praktické části se práce věnuje vyhodnocení sledovaných parametrů, kterými jsou modul pružnosti, pevnost v ohybu a mez úměrnosti pro tříbodový ohyb u bukových lamel vyztužených uhlíkovou tkaninou a u vrstvených bukových lamel vyztužených uhlíkovou tkaninou. Bukové lamely se porovnávaly ve dvou vstupních tloušťkách a to 5 mm a 9 mm a dvou modifikacích zhuštěním o 30 % a 40 %. Pro lepení bylo použito PVAc lepidlo. Ze získaných měření lze usuzovat, že stupeň zhuštění a tloušťka bukových lamel mají na měřené parametry značný vliv. Práce poskytuje možnosti dalšího zlepšení mechanicko-fyzikálních parametrů dřeva.

Klíčová slova

Vrstvené kompozity na bázi dřeva, uhlíková vlákna, mechanické vlastnosti, zhuštěné dřevo

Abstract

Composite materials with wooden base have been commonly used in the past years primarily because of their physical and mechanical characteristics and relatively low requirements for primary commodity. Finding out as much information as possible about their characteristics is an important pre-requisite for their more common usage.

This thesis is separated in several parts, the first part is dedicated to the presently most commonly used layered wood base materials and possible modifications of wood for improvement of their mechanical characteristics. Next part discusses the main mechanical parameters which are important for deciding about the suitability of modification of wood. The practical part of the thesis is dedicated to the evaluation of the set parameters which are modulus of flexibility, bending strength and limit of proportionality for three point bending of beech lamellas reinforced by carbon fibers. Beech lamellas have been compared in two input thicknesses (5 and 9 mm) and two modifications of compression (30% and 40%). PVAc adhesive has been used for gluing. From achieved measurements we can conclude that the degree of compression and thickness of beech lamellas have an important impact on the measured parameters. The thesis opens the possibility to further improve the mechanical and physical parameters of wood.

Key words:

Composite materials with wooden base, carbon fibers, mechanical characteristics, compressed wood

Obsah

Úvod.....	13
1 Cíl Práce	15
2 Modifikace dřeva	16
2.1 Modifikace působením tlaku (zhuštění)	16
3 Kompozitní materiály	18
3.1 Historie a vývoj kompozitních materiálů	18
3.2 Lepidla využívaná pro kompozitní materiály na bázi dřeva.....	19
3.2.1 Močovino-formaldehydová lepidla (UF)	19
3.2.2 Fenol-formaldehydová lepidla (PF).....	20
3.2.3 Melamin-formaldehydová lepidla (MEF)	20
3.2.4 Polyvinylacetátová lepidla (PVAc).....	20
3.2.5 Polyuretanová lepidla (PU)	21
3.2.6 Epoxidová lepidla	21
3.2.7 Polyesterová lepidla	22
3.3 Překližované deskové materiály.....	22
3.3.1 Překližka.....	22
3.3.2 Laťovka	23
3.3.3 Biodeska	24
3.4 Vrstvené materiály na bázi dřeva.....	24
3.4.1 KVH	25
3.4.2 Vrstvené dřevo - LVL	26
3.4.3 Parallam - PSL	28
3.4.4 Intrallam - LSL	28
3.4.5 Lepené lamelové dřevo - BSH.....	29
3.4.6 Křížem vrstvené dřevo - CLT.....	31
3.5 Kompozitní materiály na bázi bukového dřeva	32
3.5.1 Buk lesní.....	32
3.5.2 BauBuche.....	32
3.6 Vyztužování dřevěných vrstvených materiálů.....	33
3.6.1 Skelná vlákna.....	33
3.6.2 Aramidová vlákna.....	34

3.6.3	Uhlíková vlákna	34
3.6.4	Formy vláken	34
3.6.5	Vyztužení LVL uhlíkovými vlákny	35
4	Mechanické vlastnosti dřeva	37
4.1	Mechanické namáhání	37
4.1.1	Deformace	38
4.1.2	Napětí	38
4.2	Základní mechanické vlastnosti	39
4.2.1	Pevnost	39
4.2.2	Pružnost	40
4.2.3	Plastičnost	41
4.2.4	Houževnatost	41
4.3	Druhy mechanického namáhání	42
4.3.1	Tlak	42
4.3.2	Tah	43
4.3.3	Ohyb	44
4.3.4	Smyk	45
4.3.5	Krut	45
5	Metodika práce	46
5.1	Příprava zkušebních těles	46
5.2	Měření tří-bodovým ohybem	47
5.3	Výpočty pro sledované charakteristiky	49
5.4	Metodika vyhodnocení	50
6	Výsledky a diskuze	51
	Závěr	54
7	Seznam literatury a použitých zdrojů	56
8	Přílohy	61

Seznam ilustrací

Obr. 1 Překližka (www.dyas.cz, 2020).....	23
Obr. 2 Lat'ovka (www.fortexpardubice.cz, 2020).....	23
Obr. 3 Bideska (www.dek.cz, 2020).....	24
Obr. 4 Porovnání průřezů se stejnou pevností v ohybu. (Svoboda a kol., 2018).....	25
Obr. 5 KVH (www.2020dek.cz, 2020).....	26
Obr. 6 LVL Kerto (www.metsawood.com, 2020).....	27
Obr. 7 Parallam - PSL (www.weyerhaeuser.com, 2020).....	28
Obr. 8 Intrallam - LSL (www.dataholz.eu, 2020).....	29
Obr. 9 BSH (www.dek.cz, 2020).....	30
Obr. 10 CLT (www.mm-holz.com, 2020).....	32
Obr. 11 BauBuche (www.pollmeier.com, 2020).....	33
Obr. 12 Umístění uhlíkových vláken ve skladbě vzorku (Wei, 2013).....	36
Obr. 13 Pevnost v ohybu zkoumaných vzorků (Wei, 2013).....	36
Obr. 14 Tři roviny pružné symetrie (Požgaj, 1997).....	37
Obr. 15 Obecný pracovní diagram (Požgaj, 1997).....	39
Obr. 16 Závislost modulu pružnosti na hustotě a vlhkosti dřeva (POŽGAJ, 1997).....	41
Obr. 17 Způsoby zatížení těles při zkouškách napříč vlákny (Gandelová, 2009).....	43
Obr. 18 Zatížení dřeva při ohybu (Požgaj, 1997).....	44
Obr. 19 Tkanina SikaWrap 150 C/30 (Kříž).....	47
Obr. 20 Průběh ohybové zkoušky na TIRAtest 2850S (Kříž).....	48
Obr. 21 Zkušební tělesa po zkoušce ohybem (Kříž).....	48
Obr. 22 Princip třibodové zkoušky v ohybu - l – vzdálenost podpěr tělesa, F – působící síla, W – modul průřezu, M – ohybový modul (Kříž).....	49
Obr. 23 Modul pružnosti MOE - 2 vrstvý kompozit (vlevo) a 3 vrstvý kompozit (vpravo).....	52
Obr. 24 Mez úměrnosti LOP - 2 vrstvý kompozit (vlevo) a 3 vrstvý kompozit (vpravo).....	52
Obr. 25 Pevnost v ohybu - 2 vrstvý kompozit (vlevo) a 3 vrstvý kompozit (vpravo).....	53

Seznam tabulek

Tab. 1 Srovnání mechanických vlastností dřevěných konstrukčních materiálů (Böhm, 2012)	25
Tab. 2 Doporučené hodnoty lepeného lamelového dřeva charakteristických pevností a modulů pružnosti podle normy ČSN EN 14080	30
Tab. 3 Modul pružnosti zkoumaných vzorků (Wei, 2013).....	36
Tab. 4 Tlak a délka lisování.....	47
Tab. 5 Průměrné hodnoty sledovaných charakteristik	51

Seznam zkratek a značek

mm	milimetr
cm	centimetr
m	metr
MPa	megapascal
GPa	gigapascal
%	procento
°C	stupeň Celsia
°	úhlový stupeň
MOE	modul pružnosti
LOP	mez úměrnosti
MOR	pevnost v ohybu
DTD	dřevotřísková deska
MDF	polotvrdá dřevovláknitá deska
PF	fenol-formaldehydové lepidlo
MEF	melamin-formaldehydová lepidla
MUF	melamin-močovino-formaldehydová lepidla
UF	močovino-formaldehydová lepidla
PU	polyuretanové lepidlo
PVAc	polyvinylacetátové lepidlo
LVL	vrstvené dřevo
PSL	Parallam
LSL	Intrallam
BSH	lepené lamelové dřevo
KVH	konstrukční dřevo nastavené zubovitým spojem
CLT	křížem vrstvené dřevo
ČSN	česká technická norma
EN	evropská norma

Úvod

Dřevo je jedním z nejstarších stavebních materiálů, na který se hlavně v 19. a 20. stol. s rozmachem železobetonu trochu pozapomnělo. Konstrukce z oceli a betonu s nástupem funkcionalismu a kubismu splňovaly potřeby doby, jako je rychlost výstavby a vzhledová jednoduchost. Ocel a beton měly a mají oproti dřevu jednu velkou výhodu a to je větší odolnost proti ohni. V současné době se začíná dřevo opět dostávat do popředí zájmu díky svým specifickým vlastnostem, krásnému vzhledu, obnovitelnosti a rozvoji nových ochranných prostředků a technologických postupů pro výrobu konstrukčních prvků. Obnovitelnost dřeva je díky důrazu na ekologii velmi důležitým faktorem. Při správném hospodaření je téměř nevyčerpatelným zdrojem surovin.

Jedny z mála odvětví, kde se dřevo nepřestalo používat, jsou výroba nábytku a hudebních nástrojů. V těchto dvou odvětvích se hodně využívá rozřezání dřeva na menší části a jeho následné spojení do specifických tvarů a konstrukcí. Pomocí lepení různě tvrdých nebo barevných dřevin k sobě docílíme potřebných mechanických (např. různá tvrdost dřeva v jednom hudebním nástroji) a vzhledových (intarzie) vlastností (Brunecký, 2000). Dříve se pro lepení využívaly přírodní lepící látky, které nesplňovaly vlastnosti použitelné pro stavební prvky. S rozvojem chemického odvětví hlavně ve 20. století vznikly nové lepící směsi, které měly potřebné pevnostní vlastnosti a odolnost proti povětrnostním podmínkám. Negativním jevem byla u některých lepidel zdravotní závadnost. Toto negativum se daří vývojem a mísením lepidel v různém poměru odstranit (Král, 2014).

Dřevo má hodně kladných vlastností, ale má i některé záporné, které v minulosti zabraňovaly jeho většímu použití. Mezi tyto nedostatky patří rozměrová nestálost způsobena bobtnáním a sesycháním. Mezi další nedostatky můžeme řadit relativně malou odolnost proti působení vnějších vlivů. Modifikováním dřeva se snažíme tyto negativní vlivy co nejvíce eliminovat. Vrstvení je jedním ze způsobu modifikace dřeva. Vrstvení můžeme dělit na lamelování a překlížování (Gaff, 2016). Lamelování pomáhá zlepšovat mechanické vlastnosti výsledného dřevěného materiálu. Spojování dřeva za účelem získání lepších vlastností není úplně nová modifikace. Mezi nejstarší dosud stojící použití lepeného lamelového dřeva patří zasedací místnost King Edward VI College z roku 1866 (Pera, 2019).

V současné době konstrukční prvky z lepeného lamelového dřeva nacházejí využití při zastřešování sportovních, koncertních a výrobních hal, kostelů, při výstavbě domů a mostů. U složitějších staveb a větších rozporů zastřešení se stávají nevýhodou charakteristiky dřeva a jeho anizotropní chování z hlediska únosnosti a tuhosti. Z toho důvodu se pro vyztužování nejen dřevěných prvků využívají materiály s vysokou pevností. Nejčastěji se jedná o uhlíková, aramidová nebo skelná vlákna ve formě desek, lamel, tyčí nebo tkanin (Šilhan, 2008; Sviták, 2013).

1 Cíl Práce

Cílem práce je shrnout poznatky o vrstvených materiálech na bázi dřeva a nedřevních komponentech. Ukázat důležitost skladby a modifikace dřevěných prvků ve výsledném materiálu a jeho možnost využití v praxi. Možnosti zesílení pomocí nedřevních komponentů.

V praktické části práce je cílem vyhodnotit vliv vybraných faktorů (tloušťka materiálu, stupeň zhuštění, počet vrstev materiálu) a jejich vzájemného působení na mechanické vlastnosti, které budou zjištěny na základě tříbodového ohybu. Sledované mechanické vlastnosti jsou modul pružnosti, pevnost v ohybu a mez úměrnosti. Zkušební tělesa se budou skládat ze zhuštěné bukové lamely a uhlíkové tkaniny. Výsledné hodnoty budou porovnány s podobnými zkouškami v odborné literatuře. Naměřené hodnoty se budou vyhodnocovat v programu Matess.

2 Modifikace dřeva

Modifikací dřeva myslíme cílenou změnu jeho fyzikálních a mechanických vlastností. Dřevo má mnoho výborných vlastností (dobrý poměr pevnosti k hmotnosti, estetický vzhled atd.), ale má i řadu negativních vlastností. Mezi tyto vlastnosti patří náchylnost k biologickým škůdcům, změna rozměrů a pevnostních vlastností v závislosti na vlhkosti, degradace vzhledu v důsledku povětrnostních vlivů a jiné. Modifikací dřeva se snažíme tyto negativní vlastnosti odstranit nebo alespoň potlačit. Změna vlastností může být přechodná nebo trvalá. Je snaha aby vhodně modifikované dřevo mohlo v některých případech nahradit kovy (Matovič, 1993; Hill, 2006).

Velkou nevýhodou modifikace dřeva je jeho velká energetická náročnost a přesnost technologických procesů při výrobě. V neposlední řadě nesmíme zapomenout na náklady spojené s recyklací nebo likvidací modifikovaného dřeva (Hill, 2006).

Nejčastější modifikace dřeva vznikají:

- působením tlaku - zhuštění ,
- působením tepla – vaření, páření,
- chemickým působením – acetylace, impregnace,
- působením energie - mikrovlnné záření, vysokofrekvenční záření,
- kombinací metod – působení tepla a zhuštění, acetylace a zhuštění,
- vrstvením (kompozitní materiály) – překližování, lamelování, kombinace materiálu.

2.1 Modifikace působením tlaku (zhuštění)

Modifikací tlakem se rozumí lisování dřeva. Lisováním dochází ke zhuštění struktury dřeva, zlepšení jeho mechanických a některých fyzikálních vlastností. Vzniklé deformace jsou většinou trvalé. Velký vliv na výsledné vlastnosti má kvalita původního materiálu. Při lisování nesmíme překročit mez pevnosti, jinak dojde k porušení buněčné struktury dřeva a mechanické a fyzikální vlastnosti se zhorší. Ke zhušťování se využívá stlačení celého objemu dřeva nebo jeho některých vrstev s nebo bez použití tepla, zvlhčení nebo páry (Gaff, 2017).

Způsoby lisování se dělí na jednoosé, dvouosé a prostorové. Lisování jednoosé se provádí jen v jednom směru - podél vláken (tlak působí ve směru vláken), v tangenciálním směru (tlak působí ve směru letokruhu) a v radiálním směru (tlak působí podél dřevných paprsků). Při dvouosém lisování působí tlak ve dvou směrech a to v radiálním a tangenciálním. Takto upravené dřevo získá vysoké mechanické vlastnosti. Prostorové lisování se provádí v kapalině v podélném, tangenciálním a radiálním směru současně. Nejčastěji se lisování používá při výrobě vrstvených materiálů, kde v kombinaci s lepidlem zajišťuje kvalitní spojení jednotlivých vrstev (Požgaj,1997).

3 Kompozitní materiály

Obecná definice kompozitního materiálu je spojení dvou a více složek s rozdílnými vlastnostmi. Složky kompozitního materiálu jsou vždy jasně rozděleny, obvykle jedna slouží jako pojivo a druhá dodává pevnost. Spojením složek získá výsledný materiál vlastnosti, které ani jedna ze složek sama o sobě nemá. Nejčastěji se zlepšuje pružnost, tuhost, houževnatost a váha. Mezi nejznámější kompozitní materiály patří železobeton, asfaltová směs, sklolaminát, kompozity z uhlíkových vláken a z kompozitů na dřevní bázi pak dřevotříska a papír. Mezi přírodní kompozity patří dřevo a kosti (Dad'ourek, 2007).

3.1 Historie a vývoj kompozitních materiálů

Už kolem roku 3400 př. n. l. se v Mezopotámii používaly materiály podobné překližce, kdy k sobě slepovali plátky dřeva v různých úhlech. Staří Egyptané používali papyrus a len namočený v sádře pro vytvoření masek smrti a slámu pro zesílení cihel z bláta. Mongolští nájezdníci okolo roku 1200 n. l. vynalezli kompozitní luk, vyrobený spojením dřeva, bambusu, rohoviny a šlach skotu pomocí přírodní borovicové pryskyřice. Až do objevení střelných zbraní ve 14. století byly tyto malé přesné luky nejobávanější zbraní na světě. Chemická revoluce v 70. až 90. letech 19. století změnila vývoj kompozitů. Za použití polymerizace byly nové syntetické pryskyřice transformovány z kapalného do pevného stavu v zesíťované molekulární struktuře. Patří mezi ně celuloid, melamin a bakelit. Třicátá léta 20. století jsou považována jako nejdůležitější desetiletí v kompozitním průmyslu. V roce 1935 společnost Owens Corning představila první skelná vlákna a zahájila průmyslovou výrobu vyztužených polymerů (FRP). Roku 1936 byly patentovány nenasycené polyesterové pryskyřice. V roce 1938 byly k dispozici i další vysoce výkonné pryskyřičné systémy jako epoxidy. Druhá světová válka znamenala velký skok pro vyztužené polymery z výzkumu do výroby. Koncem 60. let 20. století se začalo v USA používat vrstvené dřevo ve stavebnictví. Byl zde vyvinut materiál jménem Press-Lam, který se dal použít jako nosný stavební materiál. Jako první na světě zavedla průmyslovou výrobu vrstveného materiálu americká firma Truss Joist Co. v roce 1972. V roce 1978 byla výroba spuštěna ve Finsku. Materiály na bázi dřeva se neustále vyvíjejí a zdokonalují. Hlavním důvodem je potřeba získání větší pevnosti, ohebnosti, pružnosti, odolnosti nebo hezčího

vzhledu. Vývoj nových zpracování dřeva vedl k potlačení negativních vlastností jako je anizotropie a nehomogenita vad snižující pevnost dřeva. Potlačením těchto vad může dřevo nahrazovat klasické stavební materiály, jako jsou beton, kovy a cihly ve stále širších případech. Mezi největší výhody kompozitních materiálů na bázi dřeva s ohledem na životní prostředí patří:

- vysoký podíl zpracování dřevních odpadů při zpracování dřeva,
- snadná zpracovatelnost,
- široké využití díky překonání rozměrů kmene a vznik materiálu s přesně definovanými rozměry,
- konstrukční materiály pro použití jak v interiéru, tak v exteriéru,
- zvětšení odolnosti při zatížení, tahu a smyku vede k větší použitelnosti kompozitních materiálů (Janovec a kol. 2008; www.mar-bal.com, 2020).

3.2 Lepidla využívaná pro kompozitní materiály na bázi dřeva

V průmyslové výrobě byla lepidla na přírodní bázi (glutinová, albuminiová a kaseinová) nahrazena lepidly syntetickými.

3.2.1 Močovino-formaldehydová lepidla (UF)

V současné době je nejpoužívanějším druhem lepidla v nábytkářském průmyslu. Za jeho rozšíření stojí hlavně nízká cena. Mezi jeho další výhody patří krátká doba potřebná pro vytvrzení, schopnost vytvrzení v širokém rozmezí teplot (10-150 °C), dobrá smyková pevnost a bezbarvá lepená spára. Velkou nevýhodou je uvolňování formaldehydu a malá odolnost proti vodě. Vyrábí se kondenzací močoviny a formaldehydu. Složitou reakcí těchto dvou chemických sloučenin se vytvářejí lineární polymery, rozvětvené polymery a i trojrozměrné sítě ve vytvrzených pryskyřicích. K urychlení vytvrzování UF lepidel se využívá tvrdidel jako je chlorid amonný, dusičnan amonný, síran hlinitý, fosforečnan amonný a jejich kombinace. UF lepidla se nejvíce využívají pro interiérovou výrobu, jako jsou DTD, MDF a překližkové desky. Dodávají se jako čirá až bílá kapalina s vyšší viskozitou, nebo ve formě bílého prášku, který je ředitelný vodou (Sandberg, 2018; Tesařová, 2014).

3.2.2 Fenol-formaldehydová lepidla (PF)

PF jsou jedním z nejstarších typů syntetických lepidel, používají se na lepení dřeva už od roku 1935. Fenol-formaldehydová lepidla jsou polykondenzační produkty vzniklé reakcí fenolu, kresolu a xylynu (nebo jejich směsí) a formaldehydu v alkalickém prostředí. Jako katalyzátor se pro urychlení reakce využívá kondenzace silných alkálií jako je hydroxid sodný a hydroxid barnatý. Typickým aditivem je močovina, která snižuje cenu a pohlcuje volný formaldehyd, ale má menší odolnost proti vodě. Lepením se vytváří pevný spoj, který je pružný, odolný proti horké vodě, povětrnostním podmínkám, mikroorganismům, většině rozpouštědel a stárnutí. Typickým znakem použití PF lepidel je červeno-fialová lepená spára. PF lepidla se rozdělují podle teploty tvrzení na tvrditelná za normální teploty a tvrditelná za vyšší teploty (135-165 °C). Nevýhodou je zdravotní závadnost. PF lepidla mají široké využití pro lepení kompozitů a laminátů. Nejvíce viditelné použití je u konstrukčních překližek a desek z orientovaných plochých třísek OSB (Král, 2014; Sandberg, 2018).

3.2.3 Melamin-formaldehydová lepidla (MEF)

Melamin-formaldehydová lepidla jsou svou chemickou strukturou podobná močovino-formaldehydovým lepidlům. Základními surovinami pro přípravu MEF lepidel jsou melamin a formaldehyd, které reagují ve vodném roztoku. Melamin je bílá krystalická látka o bodu tání 354°C, která je málo rozpustná ve vodě. Tato lepidla mají velmi dobré pevnostní vlastnosti, jsou odolná proti studené a horké vodě a povětrnostním vlivům. Ve všech těchto parametrem převyšují UF lepidlo. Velkou nevýhodou je vysoká cena melaminu, z toho důvodu se využívají ve směsi s UF lepidly. Tato směsná lepidla se označují jako melamin-močovino-formaldehydová lepidla (MUF). Nedostatkem MEF je malá stabilita roztoků při skladování a aplikaci. Vytvrzování probíhá při teplotách 120 - 140°C a v kyselém nebo neutrálním prostředí. Díky svým vlastnostem se lepidla převážně používají pro výrobu dřevotřískových a překližkových desek na venkovní konstrukce nebo pro výrobu zahradního nábytku (Böhm, 2012; Král, 2014).

3.2.4 Polyvinylacetátová lepidla (PVAc)

Polyvinylacetátová lepidla (PVAc) se připravují z acetylénu a kyseliny octové

za přítomnosti rtuťnatých solí. Z monomeru (vinylacetátu) dochází disperzním způsobem ve vodní suspenzi k přípravě polymeru polyvinylacetátu.

Mezi velké přednosti PVAc lepidel patří nízká cena, snadné použití, vysoká pevnost a pružnost spoje, téměř neviditelná lepená spára, zdravotní nezávadnost a vytvrzení za normální teploty. Smícháním s močovino-formaldehydovými lepidly lze dosáhnout zvýšení odolnosti proti vlhkosti (Liptáková, 1989).

3.2.5 Polyuretanová lepidla (PU)

Polyuretan byl objeven před 2. světovou válkou profesorem Dr. Otto Bayerem. Skutečný rozmach zaznamenal po roce 1957 s použitím nového typu polyolů na bázi polyetherů. Polyuretanová lepidla se řadí do skupiny polyadičních lepidel a vznikají pomocí adiční polymerace polyizokyanátů s vícesytnými alkoholy nebo polyestery, bohatými na hydroxylové skupiny. Polyuretanová lepidla mají velmi vysokou odolnost proti dynamickému namáhání, vysokou pružnost a také velmi dobrou odolnost proti povětrnostním vlivům a vodě. Mezi nevýhody se řadí uvolňování izokyanátu a potřeba vysokého tlaku na lepený spoj při vytvrzování. PU lepidla mohou lepit dva materiály s různou povrchovou vlhkostí, díky reakci izokyanátů s aktivním vodíkem, která probíhá na povrchu, pod povrchem i ve vzduchu. Polyuretanové lepidlo se používá na lepení rámců oken, vchodových dveří, venkovních dřevěných konstrukcí, sendvičových hranolů a trámů (Sandberg, 2018, Liptáková, 1989).

3.2.6 Epoxidová lepidla

Většinou se jedná o dvousložková reaktivní lepidla, která se vytvrzují pomocí tvrdidla. Epoxidová pryskyřice vzniká reakcí vícemocných fenolů a epichlorhydrinu. Poměrem těchto dvou složek a tvrdidel se dají upravovat výsledné vlastnosti lepeného spoje. Tuhnutí probíhá za normální teploty nebo zvýšené teploty do 120°C. Mezi výhody patří dobrá chemická a tepelná odolnost, tvrdý až elastický spoj, voděodolnost a zdravotní nezávadnost. Vysoká cena a délka vytvrzování zabraňuje masovějšímu použití. V dřevařství se nejvíce uplatňují při výrobě vrstveného dřeva a vyztužování pomocí skelných vláken. V současné době se epoxidové pryskyřice uplatňují v kusové výrobě nábytku jako designový a zpevňovací prvek (Sandberg, 2018; Mikulka, 2010).

3.2.7 Polyesterová lepidla

Hlavní složkou těchto lepidel jsou tzv. nenasyčené polyestery, které mají nejméně jednu reaktivní dvojnou vazbu. Tato vazba napomáhá k zesíťování výsledného spoje. K vytvrzení dochází přidáním organických peroxidů. Převážně se využívá k zesílení konstrukcí pomocí skelných vláken a lepení vrstveného dřeva (Mikulka, 2010).

3.3 Překližované deskové materiály

Překližované desky jsou definovány jako desky, které vzniknou slepením dvou a více vrstev z dýhy, latí a jiných materiálů. Tloušťka jednotlivých vrstev je menší než jejich délka a šířka. Norma ČSN EN 313-1 dělí překližované desky podle konstrukce na překližky, jádrové desky a složené desky. Desky se mohou také dělit podle prostředí použití na suché, vlhké a venkovní prostředí. Další dělení je podle úpravy povrchu na nebroušené, broušené, povrchově upravené a opláštěné (Svoboda, 2018).

3.3.1 Překližka

Je nejvíce používanou překližovanou deskou ve stavebním truhlářství. Jednotlivé vrstvy jsou k sobě slepeny a většinou je průběh vláken sousedních vrstev kolmý. Tloušťka jednotlivé vrstvy je max. 7 mm a skládá se z jedné nebo více dýh popřípadě ze sesazenek. Sesazenka je více dýh spojených k sobě bokem nebo čelem s rovnoběžným směrem vláken. Počet vrstev je nejčastěji lichý, vrstvy jsou od středu skládány souměrně. Nejčastěji se používají loupané dýhy a v menší míře dýhy krájené. (Dudas, 2008)

Největší předností překližek je odstranění anizotropního charakteru masivního dřeva. Překližky se běžně vyrábějí od 2 do 40 mm tloušťky. Použitím vhodného lepidla a povrchové úpravy nachází tento materiál široké uplatnění nejen v truhlářství, ale i ve stavebnictví a jako obalové materiály. Možnost tvarování překližky při lisování se hojně využívá např. pro výrobu sedáků a opěradel židlí. (Böhm, 2012).



Obr. 1 Překližka (www.dyas.cz, 2020)

3.3.2 Laťovka

Laťovka je jádrová překližovaná deska. Jádro je tvořeno z laťek, které jsou křížem z obou stran přelepeny jednou nebo dvěma vrstvami loupané dýhy. Jednotlivé laťky mohou být mezi sebou slepeny nebo neslepeny. Na laťky se nejčastěji využívá boční řezivo jehličnatých stromů, které je oboustranně frézováno, a jsou z něj vyřezány suky. Laťovky mají, podobně jako překližky, částečně eliminovaný anizotropní charakter, velmi dobrou rovinnou stálost a jsou obvykle levnější než překližky stejných tloušťek. Velmi pozitivní vlastností je poměrně velká pevnost v ohybu ve směru orientace vláken laťek. V dnešní době se používají na výrobu podlah, speciálních obalů a výrobu nábytkových dílců. Od 60. let laťovku nahrazují dřevotřískové nebo dřevovláknité desky, které jsou levnější. Nejčastěji se vyrábějí v tloušťkách 16, 19 a 25 mm, maximální tloušťka je 40 mm (Svoboda, 2018; Böhm, 2012).



Obr. 2 Laťovka (www.fortexpardubice.cz, 2020)

3.3.3 Bideska

Je třívrstvá nebo pětivrstvá konstrukční deska, která je slepena z překříženého přířezu masivního dřeva. Vrchní vrstvy jsou vždy kolmé na středovou. Hlavní příčinou vzniku bidesky bylo zachování vzhledu masivního materiálu, u kterého je odstraněn anizotropní charakter dřeva a ve velké míře omezeno bobtnání a sesychání. Tloušťka středové vrstvy je zpravidla větší než povrchových vrstev. Desky se používají nejvíce v truhlářství a stolařství a jako konstrukční materiál v pohledové a nepohledové kvalitě (Dudas, 2008).



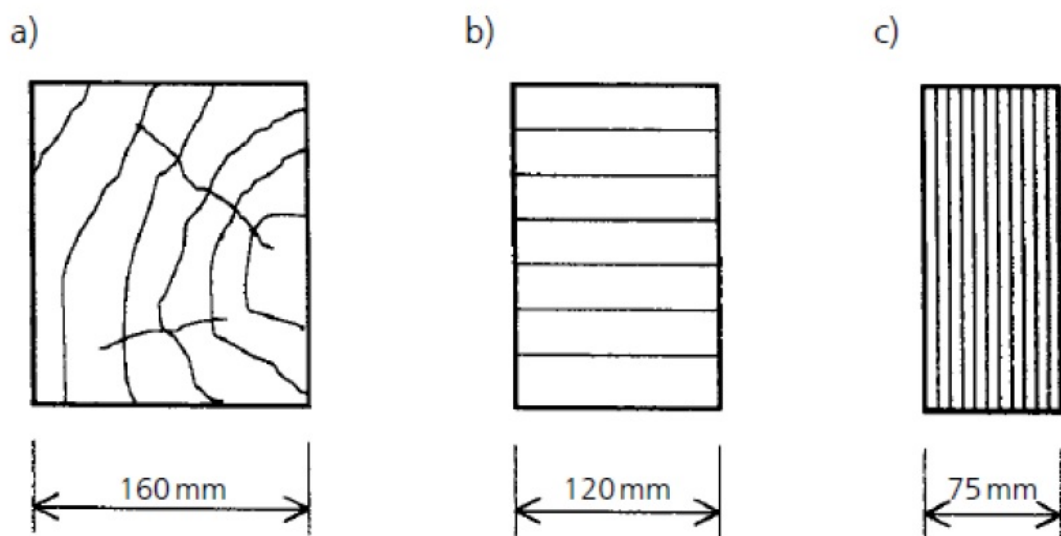
Obr. 3 Bideska (www.dek.cz, 2020)

3.4 Vrstvené materiály na bázi dřeva

Konstrukční prvky z masivního dřeva mají některé nežádoucí vlastnosti, které je dobré potlačit. Jedná se o růstové vady (suky, smolníky), bobtnání a sesychání s tím související tvarová nestálost (kroucení, smršťování, roztahování), anizotropie a maximální rozměry dané velikostí stromu. Rozřezáním dřeva na trámky, lamely a dýhy a jejich následným slepením, můžeme tyto vlastnosti zredukovat nebo dokonce odstranit. Touto úpravou dokážeme zlepšit i pevnostní vlastnosti.

Tab. 1 Srovnání mechanických vlastností dřevěných konstrukčních materiálů (Böhm, 2012)

Vlastnosti	Lepené nosníky - Glulam GL 24h	LVL - Microllam 1.9E	LVL - Kerto-S	LVL - Kerto-Q	PSL - Parallam 2.0E	LSL - TimberStrand 1.5E	Smrkové dřevo
Pevnost v ohybu (MPa)	24	21	17-20	18	16,8	13,1	12
Modul pružnosti v ohybu (MPa)	11 600	14 500	13 000	10 000	12 750	10 300	10-15 000
Hustota (kg/m ³)	380	720	480	480	710	668	350-640



Obr. 4 Porovnání průřezů se stejnou pevností v ohybu. (Svoboda a kol., 2018)

3.4.1 KVH

KVH je konstrukční dřevo nastavené zubovitým spojem. Vžitá zkratka KVH vychází z německého názvu Konstruktionsvollholz. Konstrukční dřevo se vyrábí ze silného fošnového řeziva. Nejčastěji se využívá smrk, dále modřín, jedle a douglaska. Je důležité, aby se podélně rozřízla dřev, což snižuje pozdější výskyt velkých trhlín. Řezivo je v sušících komorách podle přesně vypracovaného režimu vysušeno na vlhkost 14 ± 2 %. Díky tomu je výsledný produkt tvarově stálý. Následně jsou z řeziva vyřezány vady, jako suky, trhliny, poškozené konce atd. Na konce přířezu se vyfrézují zubovité spoje. Po nanesení lepidla jsou jednotlivé dílce délkově slepeny a slisovány. Vznikne tak nekonečný vlys, který je délkově krácen na požadovaný rozměr. Po vytvrzení lepidla je surový hranol čtyřstranně ofrézován a dále jsou strženy všechny

čtyři hrany. Tím se zvyšuje požární odolnost a usnadňuje manipulace (Svoboda, 2018; Dudas, 2008).

Hladce opracovaný hranol se vyrábí v průřezích od 40 x 60 mm do 140 x 280 mm a délce do 13 m. Podle kvality povrchu se rozlišují dva druhy. Pohledový konstrukční hranol KVH Si je bez velkých vad a používá se například pro trémové stropy. Standardní nepohledový konstrukční hranol KVH NSi má stejné mechanické vlastnosti, ale má přípustné drobné pohledové vady. Používá se do skrytých konstrukcí nebo pohledově nenáročných konstrukcí (Böhm, 2012).

Dalším produktem jsou dvouvrstvé a třívrstvé konstrukční hranoly, duo a trio hranoly. Vyrábějí se plošným slepením jednovrstvého konstrukčního hranolu. Tímto způsobem vznikne hranol o průřezu 60 x 80 mm až do 240 x 240 mm. Je důležité, aby jednotlivé přířezy byly k sobě lepeny levou stranou, čímž se zaručí maximální tvarová stabilita. Tyto hranoly mají stejné využití jako jednovrstvé KVH hranoly (Böhm, 2012).



Obr. 5 KVH (www. 2020dek.cz, 2020)

3.4.2 Vrstvené dřevo - LVL

LVL je zkratka z anglických slov Laminated Veneer Lumber. Doslovný překlad je vrstvené dýhované řezivo, volně se překládá jako vrstvené dřevo. V Normě ČSN EN 14279+A1 je definováno jako soubor vrstvených dých s převážně rovnoběžnými vlákny. Touto skutečností se liší od překližek, u kterých se směr vláken střídá. Vyrábí se z loupaných dých smrku, břízy, borovice nebo buku. Tloušťka dých se pohybuje od 2,5 do 6 mm, norma stanovuje minimální počet vrstev na pět. Pro lepení jednotlivých dých se využívají močovino-formaldehydová (UF) a fenol-formaldehydová (PF) lepidla. Dýhy

jsou skládány do souborů se zarovnanými čely. Soubory jsou pak dále vrstveny vždy tak, aby sousední soubor byl posunut v podélném směru a překrýval jej. Tímto přeložením se získá větší pevnost. Nejčastěji se používají velkorozměrové průběžné lisy. V těchto lisech jsou dýhy za vysokého tlaku a teploty okolo 145 °C vytvrzeny a částečně zhuštěny. Po vytvrzení jsou jednotlivé desky formátovány na nosníky a trámy. Velikost desek před formátováním se pohybuje: tloušťka 40-90 cm, šířka 1,8-2,5 m a délka až 26 m (některé prameny uvádějí až 35 m). Vrstvené dřevo má velmi dobré mechanické vlastnosti jako tuhost a pevnost. Pevnost v ohybu se pohybuje okolo 50 MPa a modul pružnosti v průměru okolo 14 000 MPa. Norma ČSN EN 14 374 uvádí tři třídy vrstveného dřeva:

- LVL/1 – pro použití v suchém prostředí,
- LVL/2 – pro použití ve vlhkém prostředí,
- LVL/3 – pro použití ve venkovním prostředí (Svoboda, 2018; Dudas, 2008).

A z toho vyplývající požadavky na vstupní materiál, kvalitu lepení, na zkoušky pevnosti, modulu pružnosti, hustoty a vlhkosti, reakce na oheň, uvolňování formaldehydu a přirozené odolnosti proti biologickému napadení. Vrstvené dřevo má několik obchodních názvů, v Evropě jsou nejrozšířenější Kerto (Finnforest), Microllam (Weyerhaeuser) a Ultralam (Steico). Díky svým vlastnostem jako je pevnost a rozměrová stálost se vrstvené dřevo používá na výrobu nosníků hal, příhradových nosníků, nosníků, vaznic, krokví a dalších. Protože horní vrstva dýhy je vizuálně kontrolována, lze LVL využívat jako pohledový materiál (Svoboda, 2018; Böhm, 2012).



Obr. 6 LVL Kerto (www.metsawood.com, 2020)

3.4.3 Parallam - PSL

Je zkratka z anglického Parallel Strand Lumber neboli vrstvené dřevo z dýhových pásů. PSL se vyrábí z dýhových pásů širokých 20-30 mm a dlouhých až 2,4 m. Tímto způsobem se dají vyčlenit jednotlivé vady loupané dýhy. Nejčastěji se využívá jedle, douglaska nebo kanadská jižní borovice. Na pásy se nanese fenol-formaldehydové (PF) lepidlo a parafinová emulze, která zlepšuje odolnost proti vlhkosti. Následně se pásy skládají podélně ve směru vláken a jsou zhutněny. Lisování probíhá v kontinuálních lisech a vytvrzení pomocí mikrovlnného ohřevu (Böhm, 2012; Sandberg, 2018).

Parallam se nejčastěji používá k výrobě nosníků o výšce 30-50 cm, šířce okolo 30 cm a délce běžně okolo 20 m. Délka je spíše omezena přepravními podmínkami než výrobou. Pevnost je v ohybu přibližně stejná jako u vrstveného dřeva, ale v tlaku a smyku je jeho pevnost vyšší. Vzhled Parallamu je typický tmavě červeným žíhováním díky použití fenol-formaldehydového lepidla (Svoboda, 2018).



Obr. 7 Parallam - PSL (www.weyerhaeuser.com, 2020)

3.4.4 Intrallam - LSL

LSL je vrstvené dřevo z plochých třísek. Zkratka LSL je z angličtiny Laminated Strand Lumber. Na výrobu plochých třísek o rozměrech až 30 mm na šířku a až 300 mm na délku lze využít malé stromky, vrcholky stromů a větve. Nejčastěji se využívá osikové dřevo, liliovník a ostatní listnaté dřeviny. Jednotlivé třísky se po nanesení lepidla, nejužívanějším je fenol-formaldehydové nebo polyuretanové, vrství do koberce. Podle požadované tloušťky výsledného materiálu se jednotlivé koberce vrství na sebe.

Rozeznáváme tři druhy vrstvení koberců:

- podélné – vzájemná orientace vláken všech třísek je podélná,
- kolmé – jednotlivé vrstvy třísek jdou vzájemně kolmé,
- smíšené – kombinace předešlých způsobů.

Koberce se lisují a z výsledné desky, která může mít tloušťku až 14 cm, se formátují příslušné přířezy (Böhm, 2012; Sanberg, 2018).



Obr. 8 Intrallam - LSL (www.dataholz.eu, 2020)

3.4.5 Lepené lamelové dřevo - BSH

Lepené lamelové dřevo, anglicky Glued Laminated Timber, se vyrábí z lamel, které jsou podélně nastavovány a následně slepeny do několika vrstev. Lamely jsou nejčastěji vyráběny ze smrkového dřeva, někteří výrobci používají i modřín a dub. Vstupní materiál fošny nebo silnější prkna, jejichž tloušťka se nejčastěji pohybuje mezi 32 - 40 mm, jsou vysušeny na vlhkost 15 ± 3 %. Tato vlhkost je důležitá pro tvarovou a rozměrovou stálost výsledného produktu. Po vysušení se z jednotlivých přířezů vyřežou vady, jako jsou suky a trhlíny. Následně jsou na obou stranách přířezu vytvořeny zubovité spoje a nejčastěji pomocí PVAc lepidla délkově spojeny do nekonečně dlouhé lamely. Tato lamela je následně zkracována na požadovanou délku. Po vytvrzení lepidla je lamela přesně čtyřstranně ofrézována. V další operaci je jednostranně nanesení lepidla. Používá se buď fenol-formaldehydové, které má tmavou lepenou spáru, nebo melamin-formaldehydové, které je bezbarvé. Jednotlivé lamely se vrství v šroubových lisech, kde za dílenské teploty a tlaku vytvrdnou. Po vytvrzení se slepené prvky pomocí oboustranné tloušťkovací frézy egalizují na požadované rozměry. Tato fréza má většinou maximální výšku 2 m. Tomu odpovídá maximální výška nebo šířka nosníku.

Následně se lepený prvek zkrátí na přesnou délku a je osazen kováním. Výrobky se většinou zhotovují pro konkrétní účely. Díky variabilitě šroubového lisu může být výsledný nosník rovný nebo obloukově zakřivený podle požadavků projektu. BSH je určeno především pro výstavbu skeletových staveb, velkorozporových konstrukcí, víceúčelových hal nebo mostů. Lepené lamelové dřevo se standardně vyrábí v rozměrech do 35 m na délku, 2 m na výšku a 24 cm na šířku. U rozporů, kde je potřeba větší délka, se jednotlivé nosníky spojují pomocí kloubových kování. Ojedinele se lze setkat s vertikálně lepeným dřevem, kde lepené spáry jsou kolmé ke kratší straně průřezu (Svoboda, 2018; Böhm, 2012).

Norma ČSN EN 14080 charakterizuje 4 třídy pevnosti pro lepené vrstvené dřevo – GL 24, GL 28, GL 32, GL 36.

Tab. 2 Doporučené hodnoty lepeného lamelového dřeva charakteristických pevností a modulů pružnosti podle normy ČSN EN 14080

		BL 24	GL 28	GL 32	GL 36
Ohyb (MPa)	$f_{m,k}$	24	28	32	36
Tah rovnoběžně s vlákny (MPa)	$f_{t,0,k}$	18	21	24	27
Tah kolmo k vláknům (Mpa)	$f_{t,90,k}$	0,4	0,45	0,5	0,5
Tlak rovnoběžně s vlákny (MPa)	$f_{c,0,k}$	24	26,5	29	31
Tlak kolmo k vláknům (Mpa)	$f_{c,90,k}$	2,7	3	3,3	3,6
Smyk (MPa)	$f_{v,k}$	2,5	2,5	3,5	3,5
Průměrná hodnota modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny (MPa)	$E_{0,mean}$	11600	12600	13700	14700
Průměrná hodnota modulu pružnosti kolmo k vláknům (MPa)	$E_{0,mean}$	390	420	460	490



Obr. 9 BSH (www.dek.cz, 2020)

3.4.6 Křížem vrstvené dřevo - CLT

CLT – cross laminated timber je konstrukční panel s křížem vrstveného dřeva. Počet jednotlivých vrstev je lichý a to tři, pět nebo sedm. Panely mají standardně tloušťku 100 mm u třívrstvého nebo 170 mm u pětivrstvého, ale jsou i panely s tloušťkou až 500 mm. CLT prvky mají na výšku až 3 m a na délku 16,5 až 20 m, s pomocí zubovitého spoje až 30 m. CLT prvky se používají pro konstrukce jedno nebo vícepodlažních domů, mostů a továrních hal. Hodně se využívají v kombinaci s jinými konstrukčními materiály na bázi dřeva. CLT panel je vhodná alternativa ke klasickým stavebním materiálům, jako je beton a ocel (Kuklík, 2011; Sanberg, 2018).

Pro výrobu se využívá boční řezivo, nejvíce smrkové, dále pak borovicové nebo jedlové, které má výborné mechanické vlastnosti a nižší cenu než řezivo středové. Přířezy mají tloušťku 10 až 45 mm a šířku 80 až 240 mm. Poměr šířky a tloušťky by měl být 4:1. Jednotlivé přířezy (desky) jsou čtyřstranně ofrézovány a délkově slepeny pomocí zubovitého spoje. Ve středových vrstvách zubovitý spoj nemusí být lepen, ale je to doporučeno. Desky jsou skládány vedle sebe do vrstvy, buď s bočním lepením, nebo bez něj. Podélné zubovité spoje nesmí být uloženy přímo vedle sebe, ale rozstup musí být alespoň na dvě třetiny šířky desky. Vrstvy jsou skládány a slepeny k sobě. Jednotlivé vrstvy jsou většinou na sebe kolmé, ale mohou být i pod jiným úhlem např. 45°. Pro docílení dostatečné tuhosti musí být na jednotlivé vrstvy nanесeno lepidlo. Nejčastěji se používá polyuretanové (PU) nebo melamin-močovino-formaldehydové (MUF), která jsou schválena pro zhotovování nosních konstrukčních dřevěných dílů podle evropských norem pro exteriér i interiér. Poté je celý panel lisován a vytvrzen ve velkoformátových nebo průběžných vysokofrekvenčních lisech. Pro vytvoření dlouhých formátů se následně spojuje několik panelů pomocí ozubeného spoje na délku. Jednotlivé panely se vyrábějí pro konkrétní požadavky zákazníka. Panely se po lisování a vytvrzení povrchově upravují na pohledové a nepohledové, jsou do nich frézovány a vyřezávány otvory pro dveře, okna a instalační materiál. Instalace panelů na stavbě je díky tomu velice rychlá a provádí se pomocí běžných spojovacích materiálů, určených pro dřevostavby. Na CLT prvky mohou být nanесeny další vrstvy, ať už z důvodů estetických, izolačních, stavebně-fyzikálních např. zvuková izolace nebo zvýšení požární odolnosti (Kuklík, 2011).



Obr. 10 CLT (www.mm-holz.com, 2020)

3.5 Kompozitní materiály na bázi bukového dřeva

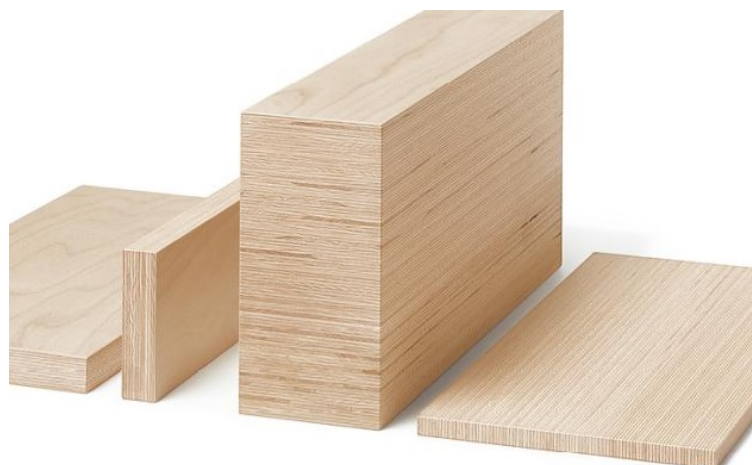
Dřevo buku lesního se může využít při výrobě velké části vrstvených a překližovaných materiálů viz přehled výše.

3.5.1 Buk lesní

Buk lesní, latinsky *Fagus sylvatica* L, se řadí mezi listnaté dřeviny roztroušeně pórovité. Barva dřeva je bělavá, po vyschnutí je celé dřevo jemně žluté až narůžovělé. U starších dřevin se může vyskytovat nepravé jádro. Dřevo buku je hojně využíváno pro výrobu loupáných a krájených dých, překližovaných a aglomerovaných materiálů, podlah a na chemické zpracování. Velké využití má pro výrobu ohýbaného nábytku. Mezi nedostatky patří malá odolnost proti biologickým škůdcům a to hlavně houbám (Mikulka, 2010; Böhm, 2012).

3.5.2 BauBuche

BauBuche je materiál vyráběný výhradně společností Pollmeier. Jedná se o laminované dýchované řezivo vyrobené z bukového dřeva. Vrstvy z loupané dýhy o tloušťce 3 mm jsou rovnoběžné nebo křížově laminované. Z BauBuche se vyrábějí nosníky, desky a podlahové prvky. Pro svojí mimořádnou pevnost se dají použít subtilnější rozměry ve srovnání s podobnými materiály z měkkého dřeva. V současné době jsou nosníky z BauBuche vyráběny o šířce 50 až 300 mm, výšce 80 až 1360 mm a délce do 18 m. Tento materiál se dá použít jako nosný nebo nenosný s pohledovou nebo nepohledovou kvalitou (www.pollmeier.com, 2020).



Obr. 11 BauBuche (www.pollmeier.com, 2020)

3.6 Vyztužování dřevěných vrstvených materiálů

Výzkumu na vyztužování nosníků z masivního dřeva, lepeného lamelového dřeva nebo z vrstveného dřeva bylo provedeno relativně hodně. Nejčastěji se nedřevní komponenty přidávají z důvodu zlepšení mechanicko-fyzikálních vlastností dřeva. Nejvíce se používají komponenty s vysokou pevností, které při správné aplikaci zvyšují pevnost a pružnost. Mezi tyto materiály se řadí vlákna uhlíková, skelná nebo aramidová (Sviták, 2013).

Faktor ovlivňující nejvíce vlastnosti vláknitých kompozitů je orientace vláken v matrici, ale i směr vláken kompozitu vůči směru vláken dřevní hmoty. (Janovec 2008)

3.6.1 Skelná vlákna

Jednotlivá vlákna se vyrábí tažením taveniny, která se skládá z oxidu křemíku s příměsí hliníku, vápníku, hořčíku, olova nebo boru, běžně se přidává i malý podíl oxidů alkalických kovů. Při krátkodobém zatížení vykazují materiály na bázi skelného vlákna vynikající vlastnosti. Pevnost v tahu skelných vláken se pohybuje kolem 1 GPa a modul pružnosti v tahu kolem 60 GPa, proto je vhodné používat tyto materiály na zpevnění konstrukcí např. při zemětřesení. Na zpevnění při trvalém namáhání by se tyto materiály používat neměly z důvodů porušení při tečení. Výhodou skelných vláken je jejich nehořlavost. Oproti uhlíkovým vláknům dosahují menších pevnostních hodnot, ale jsou levnější a proto více využívána ve stavebnictví (Šilhan, 2008).

3.6.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou propylenová umělá vlákna. Jejich obchodní název je kevlar. Pevnost v tahu u těchto vláken dosahuje zhruba 2 GPa a modul pružnosti 100 GPa. Nejsou moc dobrá pro aplikaci na dřevo z důvodu náchylnosti ke změně vlhkosti (Šilhan 2008; Wei, 2013).

3.6.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou jedním z nejdůležitějších stavebních komponent pro výrobu kompozitů v polymerní matrici. Pevnost v tahu dosahuje 4 GPa a modul pružnosti až 600 GPa. Vyrábějí se pyrolýzou z organického materiálu, jako jsou vlákna z regenerované celulózy, bitumenová nebo polyakrylonitrilová vlákna v inertní atmosféře. Na teplotě pyrolýzy závisí podíl čistého uhlíku, který je v rozmezí 93–99 %. Podle způsobu výroby dělíme uhlíková vlákna:

- částečně karbonizovaná při teplotě 400 °C s obsahem uhlíku cca 90%,
- karbonizovaná při teplotách 900–1000 °C s obsahem uhlíku 90–95 %,
- grafitová, grafitizace probíhá při teplotách 2800–3000 °C s obsahem uhlíku až 98 %.

Uhlíková vlákna jsou anizotropní s fibrilární strukturou. Samostatně vlákna nelze v praxi použít, z toho důvodu se sestavují do svazků, rohoží, volně tkaných či pletených forem. Pro praktické použití jsou vhodné rohože, tkaniny, lamely nebo prostorové kompozity (Šilhan, 2008; Sviták, 2013).

3.6.4 Formy vláken

Základní stavebním prvkem většiny forem výztuže je roving – nekonečný pramen nestočených vláken (Svoboda, 2018).

3.6.4.1 Rohože

Rohože jsou vyrobené z nasekaných nebo do sebe spletených kontinuálních vláken (rovingů). S přidáním malého množství polymerních pojiv slisována za použití tepla do rohoží. Obsah pojiv se pohybuje mezi 5–30 %. Vlákna jsou v rohožích neuspořádaná a proto má výsledný kompozit nižší tuhost a pevnost, ale výsledné

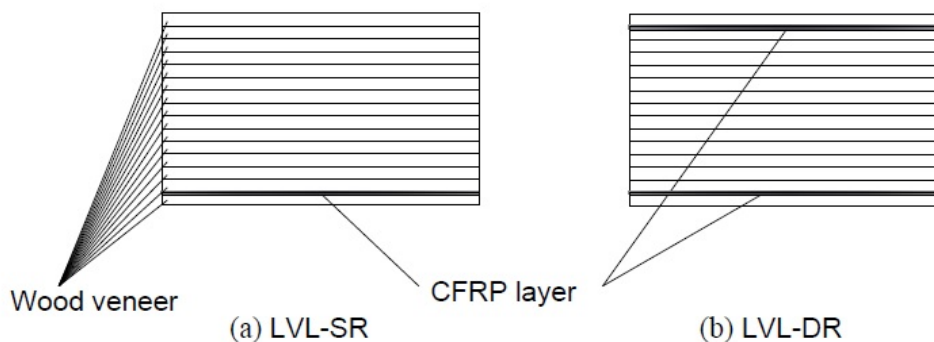
vlastnosti jsou v rovině izotropní. Vlákna ve formě rohoží nejsou vhodná na vyztužení dílců, které jsou silně namáhány na ohyb, protože se nevyužije pevnost v tahu. Rohože se hodí pro plošnou úpravu částí, kde nejsou kladeny příliš velké požadavky (Kořínek, 2015; Nenadálková, 2019).

3.6.4.2 Tkaniny

Tkaním se vyrábějí plošné materiály s vlákny uloženými kolmo na sebe. Uložením vláken do různých vazeb (plátno, kepr, atlas) se ovlivňují výsledné vlastnosti tkaniny. Čím více je vláken uložených v podélném směru, tím vyšší bude pevnost a tuhost kompozitu v tomto směru. Tkaniny mohou mít v obou kolmých směrech stejné vlastnosti, toho se využívá pro vyztužování plošných dílců. Velkou výhodou při aplikaci je tvarové přizpůsobení tkaniny vyztužovanému dílci (Kořínek, 2015).

3.6.5 Vyztužení LVL uhlíkovými vlákny

Použitím výztuhy z uhlíkového vlákna se zabýval (Wei, 2013), kdy použil dřevo topolu a uhlíková vlákna. Topol je rychle rostoucí dřevina s poměrně špatnými mechanickými vlastnostmi. Jako vstupní materiál byly použity loupané dýhy z topolů o stejném stáří a stejné oblasti původu o tloušťce 1,9 mm. Pro lepení dýh bylo použito fenol-formaldehydové lepidlo a pro lepení uhlíkových vláken epoxidové lepidlo. Uhlíková vlákna byla použita ve formě matrice z jednosměrných vláken a spojena epoxidovou pryskyřicí. Tloušťka matrice byla 0,16 mm, pevnost v tahu 1600 MPa a modul pružnosti 112 GPa. Byly zkoumány dva druhy uložení uhlíkových vláken do vrstev dřeva. Vložení vláken mezi první a druhou vrstvou dýhy z jedné strany (LVL-SR) a z obou stran (LVL-DR) viz obr. 12. Třetí skupina vzorků byla bez vlepených uhlíkových vláken a sloužila pro porovnání.



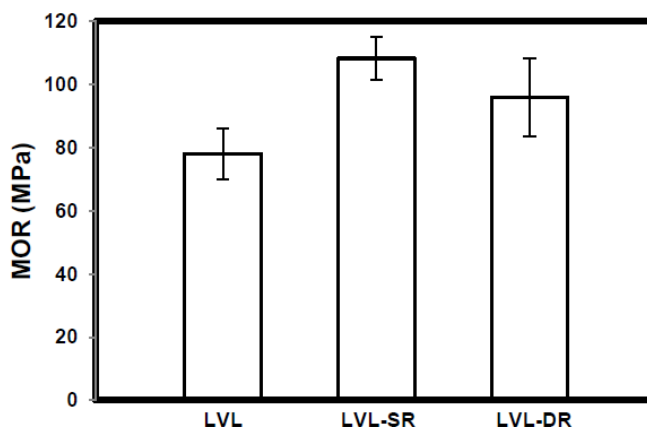
Obr. 12 Umístění uhlíkových vláken ve skladbě vzorku (Wei, 2013)

Modul pružnosti byl výrazně ovlivněn vrstvami z uhlíkových vláken, kdy nárůst u LVL-DR byl oproti LVL o 67 % viz Tab. 3.

Tab. 3 Modul pružnosti zkoumaných vzorků (Wei, 2013)

Typ vzorku	Modul pružnosti (Mpa)	Nárůst oproti LVL (%)
LVL	8142	0
LVL-SR	11384	39,8
LVL-DR	13629	67,4

Pevnost v ohybu byla vyšší u LVL-SR, tedy u vzorků vyztužených jen jednou uhlíkovou vrstvou. Wei (2013) vysvětluje tuto skutečnost tím, že horní vrstva uhlíkových vláken nefunguje příliš dobře při namáhání a dochází ke zvlnění a delaminaci několika vrchních vrstev dýhy.

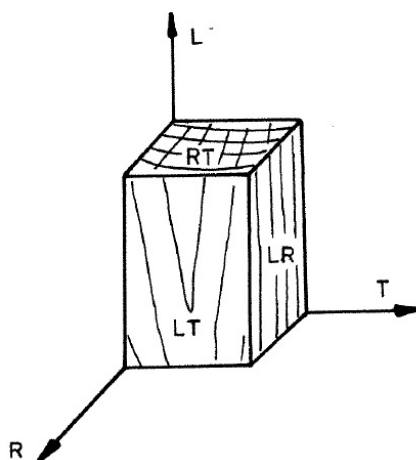


Obr. 13 Pevnost v ohybu zkoumaných vzorků (Wei a kol., 2013)

4 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanické vlastnosti dřeva jsou schopnosti dřeva odolávat účinku vnějších sil. Mechanické vlastnosti se dělí do tří skupin - základní, odvozené a technologické. Do základní skupiny patří pružnost, pevnost, plastičnost a houževnatost dřeva. Mezi odvozené vlastnosti patří tvrdost, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení a odolnost proti únavovému lomu. Technologické vlastnosti jsou štípatelnost, opotřebovatelnost, impregnovatelnost, ohýbatelnost a schopnost držet spojovací prostředky. Mechanické vlastnosti dřeva mají anizotropní charakter. Mechanické vlastnosti na úrovni mikrostruktury a makrostruktury dřeva jsou určeny orientací kovalentních a vodíkových vazeb. Pro charakteristiku mechanických vlastností dřeva se zavádí tři roviny pružné symetrie:

- příčná (transversální), značená RT,
- radiální, značená LR a
- tangenciální, značená LT (Horáček, 2010).



Obr. 14 Tři roviny pružné symetrie (Požgaj, 1997)

4.1 Mechanické namáhání

Mechanické namáhání je děj, u kterého dochází k vzájemnému působení mechanických sil a dřeva. Působením těchto sil dochází k dočasné nebo trvalé změně tvaru tělesa. Vzájemný vztah mezi napětím a deformací popisuje zobecněný Hookův zákon:

Každá složka napětí je přímo úměrná každé složce deformace (Gandelová, 2009).

4.1.1 Deformace

Deformace dřeva je změna tvarů a rozměrů, která je závislá na působení mechanických sil. Deformací dochází k posunutím bodů v tělese. Normálovými deformacemi ε označujeme prodloužení nebo zkrácení, protože jsou charakteristické pro normálová napětí. Při tangenciálních napětích vzniká kroucení tělesa do kosodélníkového tvaru a vniklá deformace se nazývá smyková γ . Deformace vyjadřuje odpor dřeva vůči působícímu napětí. Po kvalitativní stránce se deformace rozdělují na pružné deformace ε_p , deformace pružné v čase $\varepsilon_{p\check{c}}$ a plastické deformace ε_{pl} . Deformace v tělese vyvolané mechanickými silami (napětími) jsou součtem všech tří uvedených druhů $\varepsilon_c = \varepsilon_p + \varepsilon_{p\check{c}} + \varepsilon_{pl}$. Pružná deformace je vratná změna rozměrů a tvaru dřeva, která odezní hned po ukončení působení vnějších mechanických sil. Pružná deformace v čase je vratná změna rozměrů a tvaru dřeva, která nenastane hned po ukončení působení vnějších mechanických sil, ale až po určitém čase. Plastická deformace je trvalá změna rozměrů a tvaru, po ukončení působení vnějších mechanických sil těleso získává nový tvar a rozměry (Požgaj, 1993).

4.1.2 Napětí

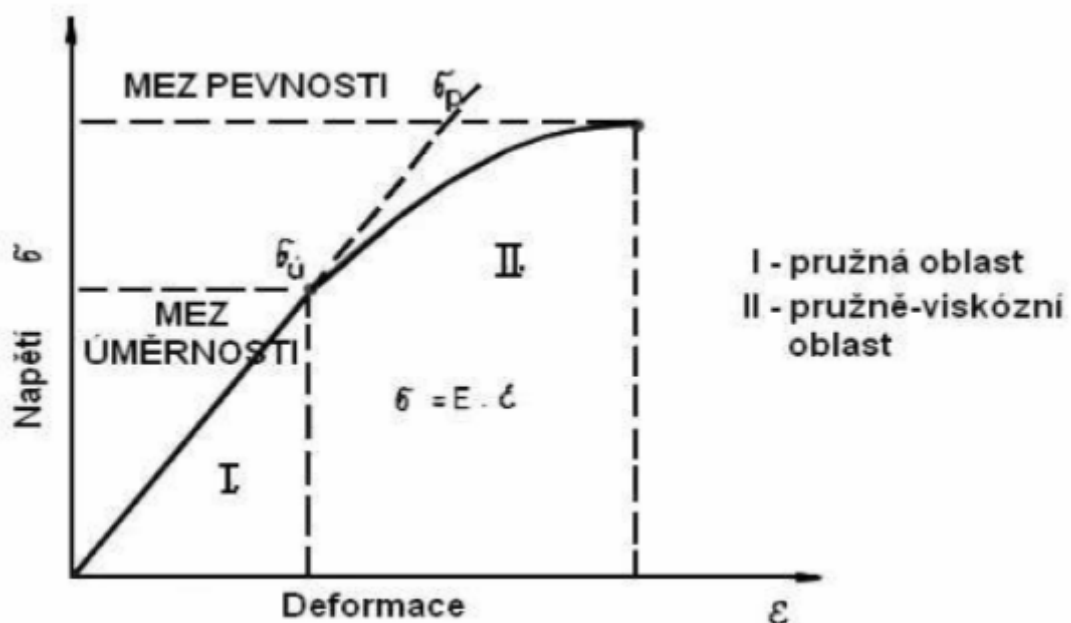
Napětí ve dřevě představuje velikost vnitřních sil, které vznikají v důsledku vnějších mechanických sil. Síly, které působí na těleso, jsou v prostoru orientovány různými směry. Pro znázornění působení vektorových sil je zapotřebí šest vzájemně kolmých rovin. Napětí σ_{ij} , měřená jako síly F na jednotku plochy S podle vztahu

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ MPa} \quad (\text{MPa}) \quad [1]$$

působící na stěnách elementu homogenně namáhaného tělesa. Vektory napětí je možno na každé ploše krychle rozložit do tří složek, jedné σ_{ij} a dvou τ_{ij} . Napětí σ_{ij} jsou normálové složky a τ_{ij} jsou tangenciální složky (Gandelová, 2009).

Pracovní deformační diagram můžeme dělit na dvě části – lineární a nelineární. Lineární část je po mez úměrnosti a nelineární část mezi mezí úměrnosti a mezí pevnosti. Mez úměrnosti představuje hranici, při které přecházejí pružné deformace do

deformací pružných v čase a plastických. Napětí je v lineární části v celém tělese rozprostřeno rovnoměrně. Když přestane působit vnější síla na těleso, deformace se vyrovnávají a těleso se vrací do svého původního tvaru. Napětí nad mezí úměrnosti není v tělese rozprostřeno rovnoměrně a deformace se stávají plastickými. Pokud přestane působit vnější síla, deformace zůstává. Mez pevnosti je napětí, při kterém dojde k porušení celistvosti (Požgaj, 1997).



Obr. 15 Obecný pracovní diagram (Požgaj, 1997)

4.2 Základní mechanické vlastnosti

Z důvodu správného a hospodárného využívání materiálu je potřeba znát jeho vlastnosti a umět je zjišťovat.

4.2.1 Pevnost

Pevnost dřeva vyjadřuje jeho odolnost proti trvalému porušení vlivem mechanického zatížení. Mez pevnosti σ_{p} je ukazatelem této vlastnosti. Tato mez je maximální hodnota zatížení, kterou vydrží těleso bez destrukce. Pro žádný způsob mechanického namáhání nelze vypočítat teoretickou pevnost dřeva. Je tedy stanovena jako skutečná pevnost dřeva. Tato hodnota se zjišťuje pomocí zkoušek, při kterých se

sleduje skutečné napětí v okamžiku porušení tělesa. Pevnost dřeva v tlaku napříč vlákny je jediná výjimka, která je určena jako konvenční pevnost, protože zde nelze dosáhnout konečného porušení tělesa.

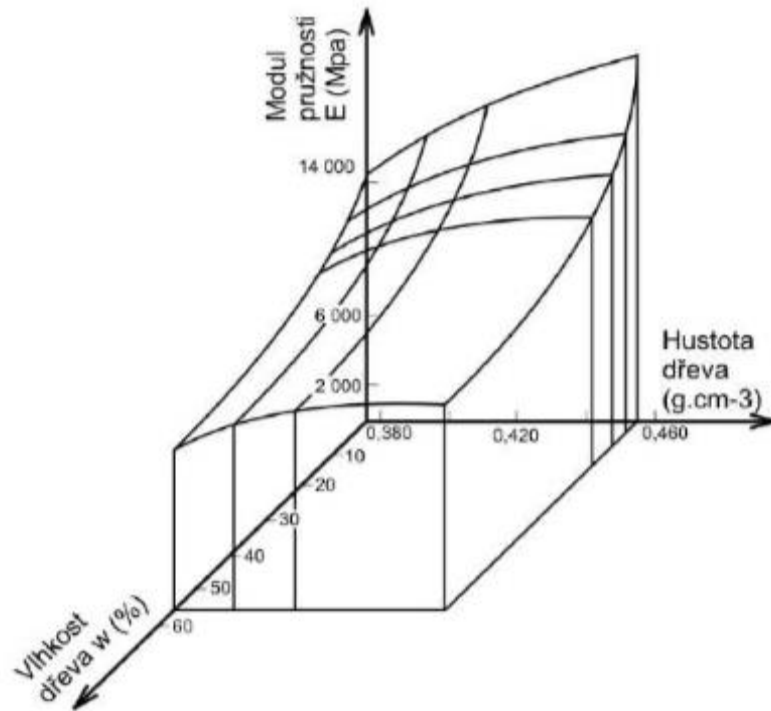
Z důvodu vzájemné porovnatelnosti měřených hodnot pevností dřeva, byla stanovena dohoda o zkušebních postupech. Mezi základní podmínky, za kterých se zkoušení provádí, patří určení velikosti tělesa, postup zkoušení a výpočet výsledků.

Pevnost dřeva v zásadě můžeme rozdělit podle:

- stavu napjatosti - jednoosý a víceosý,
- způsobu zatížení - tlak, tah, ohyb, krut a smyk,
- časového průběhu zatížení - statické a dynamické,
- účinků zatížení na dřevo - destruktivní a nedestruktivní způsob (Horáček, 2010, Dejmal, 2017).

4.2.2 Pružnost

Pružnost dřeva je definována jako schopnost dosáhnout původního tvaru a rozměru po uvolnění vnějších sil. Je určena pomocí hodnot modulu pružnosti. Jednotlivé moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím je větší napětí potřebné k vyvolání deformace. Rozeznáváme dva typy modulu pružnosti. Youngovy moduly pružnosti E při normálových namáháních (tah, tlak, ohyb) a smykové moduly pružnosti G při namáhání tangenciálním (krut, smyk). Modul pružnosti výrazně ovlivňuje vlhkost a hustota dřeva. Se zvyšující se hustotou dřeva se zvyšuje i hodnota modulu pružnosti, se zvyšující se vlhkostí se naopak snižuje. Mez pružnosti určuje určitou hranici namáhání, po které je dřevo trvale plasticky deformované nebo trvale porušeno (Horáček, 2010; Dejmal, 2017).



Obr. 16 Závislost modulu pružnosti na hustotě a vlhkosti dřeva (POŽGAJ, 1997)

4.2.3 Plastičnost

Plastičnost dřeva je schopnost dřeva měnit svůj tvar bez zjevného porušení vlivem působení vnějších sil. Změna tvaru je po skončení působení vnějších sil trvalá. Při krátkodobém zatížení se plastická deformace začne projevovat až po překročení meze úměrnosti. Plastická deformace se při dlouhodobém zatížení začne objevovat od počátku zatížení a dřevo se chová jako viskózně-pružný materiál. Dřevo bude mít větší plastičnost, čím větší bude plastická deformace bez vzniku viditelného porušení (Požgaj, 1997).

4.2.4 Houževnatost

Houževnatost je mechanickou prací, která je spotřebována na vznik plastické deformace. Rozlišujeme podle druhu zatížení houževnatost statickou a dynamickou (rázovou). Statickou houževnatostí se rozumí spotřebovaná mechanická energie, která je potřeba na vznik plastické deformace. Dynamická houževnatost dřeva je schopnost absorbovat práci vykonanou rázovým ohybem. Rázovou houževnatost vyjadřuje spotřebovaná energie potřebná na přeražení dřeva (Horáček, 2010).

4.3 Druhy mechanického namáhání

Mechanické namáhání je proces, kdy nastává ovlivnění mezi mechanickými silami nebo jiným činitelem namáhání a dřevem. Reakce dřeva na mechanické namáhání nezávisí jen na vazbách chemických složek dřeva a jejich spojení, ale často v rozhodující míře na geometrii tělesa (Požgaj, 1997; Matovič, 1993).

4.3.1 Tlak

Pevnost dřeva v tlaku se určuje na směru působící síly k orientaci vláken a letokruhů. Rozlišujeme dva hlavní směry působení síly na tlak ve směru vláken a na tlak napříč vlákny. Tlak napříč vlákny ještě dělíme na směr radiální a tangenciální.

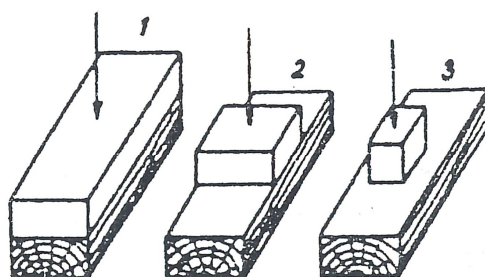
4.3.1.1 Pevnost v tlaku ve směru vláken

Působením tlaku na těleso ve směru vláken dojde k deformaci, která se projeví zkrácením délky tělesa. Při tomto působení sil dochází k poruše mikroskopické stavby jednotlivých elementů, zakřivení vláken, dále se deformují buněčné stěny a celá vlákna. Při stejném tlaku dojde u různých dřevin k různému zkrácení. Důležitou roli hraje hustota a vlhkost dřeva. Průměrná hodnota meze pevnosti v tlaku ve směru vláken u dřev s vlhkostí 12% se udává přibližně 50 MPa (Gandelová, 2009).

4.3.1.2 Pevnost v tlaku napříč vlákny

Na rozdíl od tlaku ve směru vláken nebývá u tlaku napříč vlákny dřevo porušeno oddělováním jednotlivých částí. Dojde k postupné deformaci a zhušťování dřevní struktury. Rozlišují se tři druhy působení síly ve směru napříč vlákny:

- tlak na celou plochu (1),
- tlak na část délky (2),
- tlak na část délky a šířky (3) (Gandelová, 2009).



Obr. 17 Způsoby zatížení těles při zkouškách napříč vlákny (Gandelová, 2009)

4.3.2 Tah

Stejně jako u pevnosti v tlaku rozdělujeme s ohledem na anizotropii pevnost v tahu do dvou hlavních skupin:

- pevnost v tahu ve směru vláken,
- pevnost napříč vlákny.

Pevnost v tahu napříč vlákny se dále dělí na směr radiální a tangenciální.

4.3.2.1 Pevnost dřeva v tahu ve směru vláken

V porovnání s ostatními pevnostmi je pevnost dřeva v tahu ve směru vláken největší. Velká pevnost je nejvíce zapříčiněna vláknitým tvarem buněk a strukturou buněčných stěn. Průměrná hodnota tahové pevnosti pro všechna naše dřeva se udává 120 MPa. Přestože je tahová pevnost ve směru vláken velká, nemůžeme tuto vlastnost využít v plném rozsahu, protože často dochází k poruše dřeva v místech upevnění konstrukčních dílů (Gandelová, 2009).

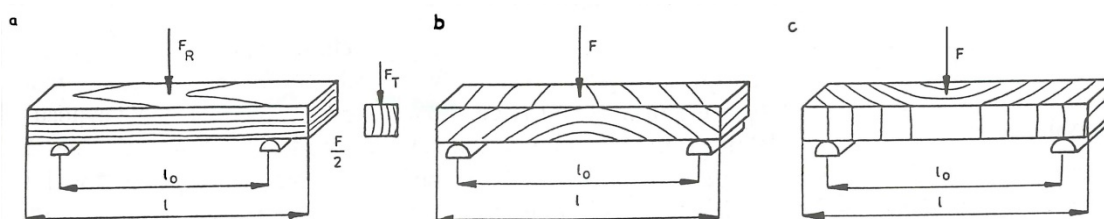
4.3.2.2 Pevnost dřeva v tahu napříč vlákny

Na rozdíl od pevnosti v tahu ve směru vláken má dřevo zatěžované v tahu napříč vlákny jednu z nejmenších pevností. Mez pevnosti v radiálním tahu je větší než v tangenciálním. Nízká pevnost v tahu kolmo na vlákna je způsobena orientací vazebních sil. V tomto směru se většinou projevují vodíkové vazby a Van der Waalsovy vazby. Tyto vazby jsou řádově nižší než vazby kovalentní. Průměrná pevnost v tahu napříč vlákny se uvádí od 1,5 do 5 MPa. Z toho důvodu je potřeba se vyhnout takovému zatížení na nosné konstrukce (Gandelová, 2009; Matovič, 1993).

4.3.3 Ohyb

Z hlediska směru průběhu vláken se rozděluje pevnost v ohybu na :

- Pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají rovnoběžně s podélnou osou tělesa a síla působí napříč vlákny v radiálním a tangenciálním směru (a),
 - Pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa, kdy příčný řez je orientován ve směru působící síly (b) nebo kolmo k působící síle (c)
- Obr.18 (Požgaj, 1997).



Obr. 18 Zatížení dřeva při ohybu (Požgaj, 1997)

Pevnost dřeva v ohybu kolmo na vlákna má velké uplatnění v konstrukčních prvcích (nosníky, trámy). Právě proto se u pevnostních zkoušek dřeva v ohybu orientují dřevěná zkušební tělesa nejčastěji tak, aby zatížení působilo napříč vlákny v tangenciálním směru. Větší rozdíly mezi pevnostmi dřeva v ohybu v radiálním a tangenciálním směru byly zjištěny u dřeva jehličnatých dřevin. Mez pevnosti v ohybu v tangenciálním směru je o 10–12 % větší než v radiálním směru. U listnatých dřevin je hodnota meze pevnosti při statickém ohybu minimální. Rozdíl se maximálně pohybuje mezi 2-4 % (Gandelová, 2009).

Při zatěžování tělesa vznikne v jeho dolní části tah a v horní části tlak. S důrazem na to, že tlaková pevnost dřeva v ohybu podél vláken je mnohem menší než tahová pevnost, začne deformace tělesa nejdříve v tlakové oblasti. Při překročení meze pevnosti dojde k porušení a následnému zlomení v tahové oblasti. Mez pevnosti ve statickém ohybu napříč vlákny je průměrně 100 MPa (Horáček, 2010).

4.3.4 Smyk

Podobně jako u předešlých pevnostních vlastností má dřevo různou smykovou pevnost ve třech základních směrech. Čistý jednosměrný smyk bez spolupůsobení napětí z jiného směru se neobjevuje. Z toho důvodu je obtížné stanovit podmínky čistého smyku. Ve dřevě rozlišujeme tři základní pevnosti ve smyku:

- smyková pevnost ve směru vláken v radiální a tangenciální rovině,
- smyková pevnost napříč vláken v radiální a tangenciální rovině,
- smyková (stříhová) pevnost napříč vláken v příčné rovině v radiálním a tangenciálním směru (Horáček, 2010).

4.3.5 Krut

Při zatěžování dřeva krutem vznikají smyková napětí ve dvou na sobě kolmých rovinách – v rovině paralelní s osou a v rovině kolmé k ose krouceného dřevěného tělesa. Když je osa tělesa ve směru rovnoběžně s vlákny dojde k porušení tělesa smykem podél vláken ve formě trhlin. Je-li osa tělesa ve směru kolmo na vlákna, dochází k porušení napříč vláken (Horáček, 2010).

5 Metodika práce

5.1 Příprava zkušebních těles

Jednotlivé části zkušebních těles se vyřezávaly pomocí zkracovací pily z lamel buku lesního o tloušťce 5 mm a 9 mm. Jednotlivé bukové lamely měly radiální řez, přibližnou délku 2 m, šířku 35 mm a broušený povrch. Pro zachování stejných parametrů dřeva, je důležité, aby se sada zkušebních těles vyřezala z jedné bukové lamely. Jednotlivá vyřezaná tělesa nesměla mít viditelné vady, jako jsou suky a praskliny. Délka zkušebního tělesa se určila podle vztahu $20 \times \text{tloušťka lamely} + 40 \text{ mm}$, tedy 140 mm u tloušťky lamely 5 mm a 220 mm u tloušťky lamely 9 mm. Jednotlivá zkušební tělesa se zhušťovala o 30 % nebo o 40 %. Celkem se připravovala zkušební tělesa pro 4 měření. Každé měření obsahovalo 30 sad zkušebních těles o stejné tloušťce a stejném zhuštění, celkem se tedy jednalo o 120 sad zkušebních těles. Jedna sada obsahovala zkušební těleso s nalepenou uhlíkovou tkaninou (2 vrstvý kompozit) a slepená dvě zkušební tělesa s nalepenou uhlíkovou tkaninou (3 vrstvý kompozit).

Značení měřených vzorků T – BK – Z – CA – XX/XX' / XX ''.

T – značí tloušťku zkušebního tělesa v mm, tedy 5 mm nebo 9 mm

BK – druh dřeviny zkušebního tělesa, tedy Buk

Z – procento zhuštění zkušebního tělesa, tedy 30% nebo 40%

CA – druh materiálu použitého pro vyztužení zkušebních těles, tedy uhlíková tkanina SikaWrap 150C/30

XX – číslo zkušebního tělesa pro 2 vrstvý kompozit, tedy 1-30

XX', XX'' - značení zkušebních těles, která byla slepena k sobě pro 3 vrstvý kompozit.

Po rozměření a označení jednotlivých zkušebních těles se bukové lamely rozřezaly na kotoučové zkracovací pile. Následovalo zhuštění jednotlivých zkušebních těles o 30 a 40 %. Zhuštění se provádělo na hydraulickém lisu TOS Rakovník při teplotě vyhřívaných desek 140 °C. Požadované procento zhuštění, tedy potřebná tloušťka výsledného tělesa, se docílilo pomocí ocelových zarážek s přesností na setinu milimetru. Potřebný lisovací tlak a délka lisování jsou zobrazeny v Tab. 4.

Tab. 4 Tlak a délka lisování

Tloušťka lamely a procento zhuštění	Tlak (MPa)	Čas (min)
Lamely 5 mm (30 %)	34.2	7
Lamely 9 mm (30 %)	42.7	11
Lamely 5 mm (40 %)	36.3	8
Lamely 9 mm (40 %)	43.4	12

Po zhuštění se nechala zkušební tělesa 4 dny aklimatizovat, z důvodu projevení pružných deformací v čase a natažení vlhkosti zpět, kterou při lisování ztratila. Následně byla zkušební tělesa s označením XX' a XX'' slepena k sobě pomocí PVAc lepidla AG – COLL 8761 D3 technický list viz Příloha A. Lepidlo bylo nanášeno v jedné vrstvě. Tělesa byla k sobě stažena pomocí ručních svorek, aby bylo docíleno rovnoměrného tlaku a dobrého vytvrzení. Doba lisování se pohybovala mezi 20 a 30 minutami. Po vytvrzení lepidla byla na vzorky nalepena opět pomocí PVAc lepidla AG – COLL 8761 D3 uhlíková tkanina SikaWrap 150C/30 technický list viz Příloha B. Celá sestava byla opět stažena pomocí ručních svorek a ponechána tak do vytvrzení lepidla. Doba lisování se opět pohybovala mezi 20 a 30 minutami. Po uvolnění svorek byla odříznuta přesahující uhlíková tkanina a sady zkušebních těles byly připraveny na ohybovou zkoušku.



Obr. 19 Tkanina SikaWrap 150 C/30 (Kříž)

5.2 Měření tří-bodovým ohybem

Jednotlivá zkušební tělesa byla namáhána pomocí trhačím stroje TIRAtest 2850S na tříbodovou zkoušku v ohybu.

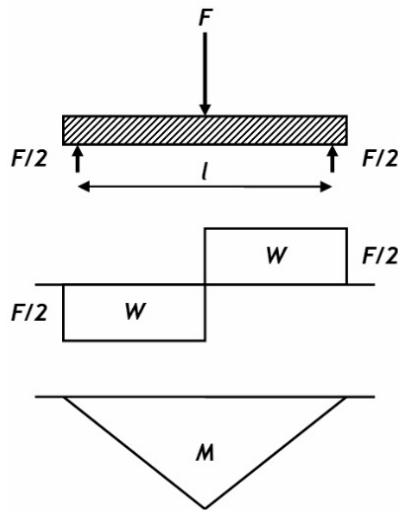


Obr. 20 Průběh ohybové zkoušky na TIRAtest 2850S (Kříž)



Obr. 21 Zkušební tělesa po zkoušce ohybem (Kříž)

Ohybová zkouška probíhala podle normy ČSN EN 310. Princip ohybové zkoušky je v uložení zkušebního tělesa na dvě podpěry a zatížení v jeho středové části. Rozpětí podpěr je stanoveno, jako dvacetinásobek tloušťky zkušebního tělesa v našem případě byla tloušťka 5 mm a 9 mm. Výstupem měření je průhybový diagram, který byl použit pro následné výpočty sledovaných charakteristik, kterými jsou modul pružnosti kolmý na vlákna v radiálním směru, mez úměrnosti a pevnost v ohybu.



Obr. 22 Princip tříbodové zkoušky v ohybu - l – vzdálenost podpěr tělesa, F – působící síla, W – modul průřezu, M – ohybový modul (Kříž)

5.3 Výpočty pro sledované charakteristiky

Modul pružnosti kolmý na vlákna v radiálním směru pro tříbodový ohyb podle EN 310 (1993):

$$MOE = \frac{(F_2 - F_1) \times l_0^3}{4 \times b \times h^3 \times (a_2 - a_1)} \quad (\text{MPa}) \quad [2]$$

Kde: MOE – modul pružnosti kolmý na vlákna v radiálním směru (MPa),

l_0 – vzdálenost mezi středy podpěr (mm),

b – šířka zkušební tělesa (mm),

h – tloušťka zkušební tělesa (mm) a

$F_2 - F_1$ – zvýšení síly v lineární sekci diagramu (N).

Hodnota F_1 by měla být přibližně 10% a F_2 přibližně 40% zatížení při přetržení.

Rozdíl $a_2 - a_1$ je nárůst průhybu v polovině délka zkušební vzorek (což odpovídá růstu nakládací $F_1 - F_2$ (Babiak a kol., 2018).

Mez úměrnosti pro tříbodový ohyb podle EN 310 (1993):

$$LOP = \frac{3 \times F_E \times l_0}{2 \times b \times h^2} \quad (\text{MPa}) \quad [3]$$

Kde: LOP – mez úměrnosti pro tříbodový ohyb (MPa),

F_E – síla na hranici meze úměrnosti (N),

l_0 – vzdálenost mezi středy podpěr (mm),

b – šířka zkušebního tělesa (mm),

h – tloušťka zkušebního tělesa (mm) (Babiak a kol., 2018).

Pevnost v ohybu podle EN 310 (1993):

$$MOR = \frac{3 \times F_{max} \times l_0}{2 \times b \times h^2} \quad (\text{MPa}) \quad [4]$$

Kde: MOR – Pevnost v ohybu (MPa),

F_{max} – maximální (lomová) síla (N)

l_0 – vzdálenost mezi středy podpěr (mm),

b – šířka zkušebního tělesa (mm),

h – tloušťka zkušebního tělesa (mm) (Gáborík a kol., 2016).

5.4 Metodika vyhodnocení

Výsledné charakteristiky, zjištěné při tříbodovém ohybu, modulu pružnosti, meze úměrnosti a pevnosti v ohybu byly statisticky zpracovány v programu Matess. K vyhodnocení byla použita faktorová analýza rozptylu. Tato analýza rozptylu hodnotí účinky vybraného faktoru na sledovanou charakteristiku.

K hodnocení účinku vybraného faktoru byl použit Duncanův test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. F-test na základě hladiny významnosti P stanoví, zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný a pokud ano tak v jaké míře. Podle hodnoty P se sledovaný faktor hodnotí podle následujících kritérií:

- $P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky významný,
- $P > 0,05$ vliv faktoru není statisticky významný,
- $P = 0,05$ vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti,
- $P = 0$ faktor působí,
- $P < 0,001$ vliv faktoru je statisticky velmi významný,
- $0,001 < P < 0,01$ vliv faktoru je statisticky středně významný,
- $0,01 < P < 0,05$ statisticky málo významný vliv faktoru (Gaff a Gáborík, 2009).

6 Výsledky a diskuze

V Tab. 5 jsou vidět průměrné hodnoty modulu pružnosti, meze úměrnosti a pevnosti v ohybu a jejich variační koeficient. V prvním sloupci je kódové označení zkušebního tělesa, kde je vidět tloušťka vstupních lamel 5 mm nebo 9 mm a stupeň zhuštění 30 % nebo 40 %. V posledním sloupci je počet měřených zkušebních těles.

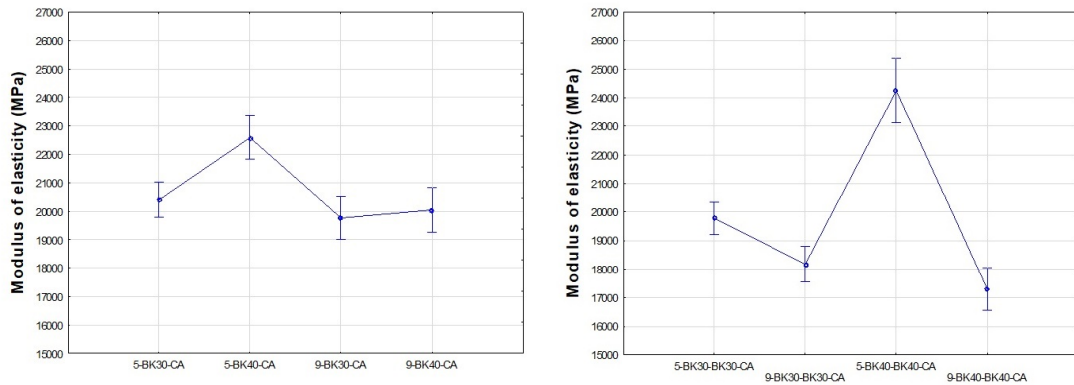
Tab. 5 Průměrné hodnoty sledovaných charakteristik

Typ zkušebního tělesa	Dvou vrstvý kompozit (buková lamela a uhlíková tkanina)						
	Modul pružnosti MOE (MPa)	Variační koeficient	Mez úměrnosti LOP (MPa)	Variační koeficient	Pevnost v ohybu MOR (MPa)	Variační koeficient	Počet zkušebních těles
5-BK30-CA	20401	8,08	120	20,38	232	9,7	30
5-BK40-CA	22591	9,13	141	22,92	281	6,92	30
9-BK30-CA	19765	10,32	127	9,92	211	8,35	30
9-BK40-CA	20050	10,42	141	13,24	234	7,22	30
Tří vrstvý kompozit (2 x buková lamela a uhlíková tkanina)							
5-BK30-CA	19775	7,72	113	10,52	212	8,22	30
5-BK40-CA	24251	12,43	156	11,26	278	9,04	30
9-BK30-CA	18177	9,33	110	12,36	186	11,73	30
9-BK40-CA	17305	11,59	115	10,06	185	9,95	30

Na Obr. 23 jsou vidět jednotlivé výsledky pro modul pružnosti pro dvou vrstvý a tří vrstvý kompozit. Z grafů na Obr. 23 a z Tab. 5 je patrná tendence poklesu modulu pružnosti u zkušebních těles u více vrstevých kompozitů. Je vidět, že větší modul pružnosti se dosahoval při vstupní tloušťce lamel 5 mm a zhuštění o 40 %. U tloušťky vstupních lamel 9 mm se významně neprojevovalo zhuštění na výsledné hodnoty. U obou zhuštění tedy o 30 % a 40 % je výsledný modul pružnosti u dvou vrstvého kompozitu skoro totožný, u tří vrstvého kompozitu se změna hustoty lamel projevila více. Výsledné hodnoty jsou statisticky velmi ovlivněny materiálem, jak vyplývá z Duncanova testu Příloha C z hladiny významnosti nastavenou na $P=0,05$.

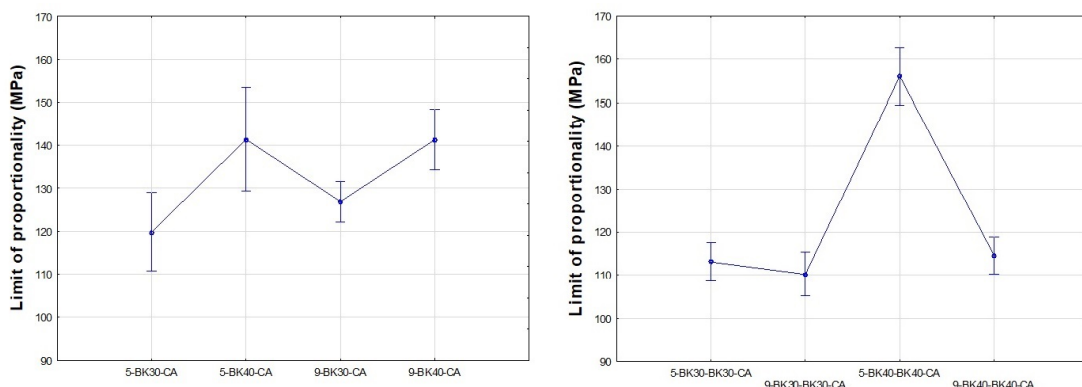
Ve své práci (Gáborík a kol.; 2016) uvádí modul pružnosti masivního neupraveného dřeva v průměru 11 600 MPa. Naše průměrné hodnoty modulu pružnosti pro dvou vrstvý kompozit se pohybovaly v rozmezí 19 700 – 22 600 MPa a u tří

vrstvého kompozitu 17 300 – 24 200 MPa. Z těchto hodnot je patrný značný vliv zhuštění a nalepené uhlíkové tkaniny na výsledný modul pevnosti.



Obr. 23 Modul pružnosti MOE - 2 vrstvý kompozit (vlevo) a 3 vrstvý kompozit (vpravo)

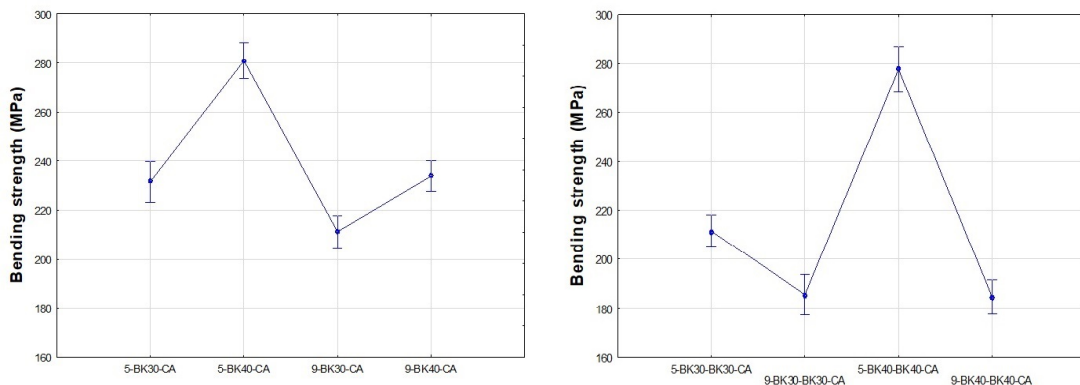
Obr. 24 znázorňuje mez úměrnosti pro měřená zkušební tělesa pro dvou vrstvý a tří vrstvý kompozit. Z grafů na Obr. 24 a z Tab. 5 je vidět podobná výsledková tendence jako u modulu pružnosti. Lepších výsledků je dosaženo u 5 mm vstupního materiálu zhuštěného o 40 %. Nejvyšší hodnoty meze úměrnosti bylo dosaženo u tří vrstvého tělesa s tloušťkou lamel 5 mm a zhuštěním o 40 %. U výsledků u dvou vrstvého kompozitu je větší variační koeficient, to může být způsobeno např. vadami ve dřevě zkušebních vzorků. Pro detailnější analýzu se použil Duncanův test Příloha D s hladinou významnosti nastavenou na $P = 0,05$.



Obr. 24 Mez úměrnosti LOP - 2 vrstvý kompozit (vlevo) a 3 vrstvý kompozit (vpravo)

Výsledky pro pevnost v ohybu jsou vidět na Obr. 25. Hodnoty byly významně statisticky ovlivněny všemi parametry. Trend výsledných hodnot pevnosti v ohybu je podobný jako u předešlých charakteristik. Výsledné hodnoty jsou u tří vrstevých kompozitů menší než u dvou vrstevých. Výjimku tvoří dvou a tří vrstvý kompozit o tloušťce vstupních lamel 5 mm a zhuštění o 40 %, kde se změna počtu bukových lamel zkušebních těles téměř neprojevila. Analýza detailnějších hodnot byla provedena pomocí Duncanova testu Příloha E s hladinou významnosti $P=0,05$.

Ve své práci (Wehsener a kol. 2016) uvádí průměrnou pevnost v ohybu neupraveného bukového dřeva 138 MPa a zhuštěného bukového dřeva o 43 % 239 MPa. U dvou vrstvého zkušebního tělesa s bukovou lamelou zhuštěnou o 40 % byly průměrné výsledky 281 MPa (5 mm tloušťka lamely) a 234 MPa (9 mm tloušťka lamely) a u tří vrstvého zkušebního tělesa s bukovou lamelou zhuštěnou o 40 % 278 MPa (5 mm tloušťka lamely) a 185 MPa (9 mm tloušťka lamely). Vliv počtu vrstev materiálu má na výslednou hodnotu pevnosti v ohybu značný vliv.



Obr. 25 Pevnost v ohybu - 2 vrstvý kompozit (vlevo) a 3 vrstvý kompozit (vpravo)

Závěr

V teoretické části bakalářské práce je zpracována literární rešerše poznatků o vrstvených materiálech na bázi dřeva a způsobu modifikace potřebných pro zvýšení jejich mechanických a fyzikálních vlastností.

V praktické části bakalářské práce bylo cílem zhodnotit vliv vybraných faktorů (tloušťka materiálu, stupeň zhuštění materiálu počet vrstev materiálu) na mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost v ohybu a mez úměrnosti), které byly zjišťovány tříbodovým ohybem. Zkoušky byly prováděny na vrstvených zkušebních tělesech z bukových lamel a uhlíkové tkaniny. Vstupní bukové lamely o tloušťkách 5 mm a 9 mm byly zhuštěny o 30 % nebo 40 % a spojeny s uhlíkovou tkaninou pomocí PVAc lepidla do dvou nebo tří vrstevných zkušebních těles.

Na výsledcích modulu pružnosti lze říci, že u všech zkušebních těles je vliv tloušťky a stupně zhuštění statisticky významný. Trend modulu pružnosti je rostoucí s výjimkou u tří vrstevných zkušebních těles s tloušťkou 9 mm, kdy byl zaznamenán pokles při zhuštění o 30 % na 40 %. Z hlediska modulu pružnosti dosáhla nejvyšších hodnot skupina zkušebních těles s tloušťkou lamel 5 mm a zhuštění o 40 %.

Mez úměrnosti je u všech zkušebních těles statisticky ovlivněna tloušťkou a stupněm zhuštění. Celkově bylo dosaženo lepších výsledků zkušebních těles s tloušťkou lamel 5 mm než 9 mm. U zkušebních těles s tloušťkou lamel 5 mm se projevil vliv zhuštění z 30 % na 40 % skokově, u lamel s tloušťkou 9 mm byl rozdíl pozvolný. Nejvyšší meze úměrnosti dosáhla skupina zkušebních těles tloušťky lamel 5 mm a při zhuštění o 40 %.

Pro pevnost v ohybu je tloušťka materiálu a stupeň zhuštění statisticky významný vliv. Se zvyšujícím se zhuštěním stoupá i pevnost v ohybu s jedinou výjimkou u skupiny tří vrstevných zkušebních těles s tloušťkou lamel 9 mm, kde zhuštěním nemá žádný vliv. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo u sad zkušebních těles s tloušťkou lamel 5 mm a zhuštěním o 40 %. V tomto případě počet vrstev neměl vliv.

Výsledky změření zkušebních těles mohou najít uplatnění při navrhování dřevěných konstrukcí, u kterých je potřeba zajistit vysoká pevnost a kde nesmí docházet k deformacím jednotlivých dílců. Velké uplatnění by hlavně měl materiál uplatnění v místech, kde je potřeba velká pevnost v ohybu.

Toto měření by se dalo rozšířit o porovnání mechanických vlastností při čtyřbodovém ohybu nebo za použití jiného spojovacího materiálu nebo jiné skladby vrstev zkušebních těles.

7 Seznam literatury a použitých zdrojů

Literatura

BRUNECKÝ, Petr. Historický vývoj nábytku. Vyd. 2., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2000. ISBN 80-7157-441-4.

BÖHM, M.; REISNER, J. a BOMBA, J. (2012). Materiály na bázi dřeva. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra zpracování dřeva, 2012. 183 s. ISBN 978-80-213-2251-6.

DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály - druhy a jejich užití. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.

Dřevo od A do Z. 3. vyd. Přeložil Lumír MIKULKA. Čestlice: Rebo, 2010. ISBN 978-80-255-0389-8.

DUDAS, Juraj a Stanislav JOCHIM. Konštrukčné drevné materiály pre drevené stavebné konštrukcie a výrobky. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1938-1.

GANDELOVÁ, Libuše, Petr HORÁČEK a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. Nauka o dřevě. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. ISBN 978-80-7375-312-2.

HAVÍŘOVÁ, Zdeňka. Technická mechanika I.: (základy statiky, pružnost a pevnost). Vyd. 2., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2003. ISBN 80-7157-667-0.

HILL, Callum A. S. Wood modification: chemical, thermal and other processes. Chichester: John Wiley, 2006. Wiley series in renewable resources. ISBN 0-470-02172-1.

HORÁČEK, Petr, Mechanické vlastnosti dřeva, Studijní pomůcka, 2010

HORÁČEK, Petr. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998. ISBN 80-7157-347-7.

HRÁZSKÝ, Jaroslav a Pavel KRÁL. Kompozitní materiály na bázi dřeva. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2007, Část I., Aglomerované materiály. ISBN 978-80-7375-034-3.

JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. Perspektivní materiály. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01282-4.

KRÁL, Pavel a Jaroslav HRÁZSKÝ. Kompozitní materiály na bázi dřeva. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2005, Část 2, Dýhy a vrstvené masivní materiály. ISBN 80-7157-878-9.

KUKLÍK, Petr.; MELZEROVÁ, Lenka. Kompozitní materiály na bázi dřeva. ČVUT Praha, 2011, 76 s. ISBN 978-80-01-04958-7

MATOVIČ, Anton. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: určeno pro posl. lesnické fak., obor dřevařský a lesnický. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. ISBN 80-7157-086-9.

LIPTÁKOVÁ, Eva a Milan SEDLIAČIK. Chémia a aplikácia pomocných látok v drevárskom priemysle. Bratislava: Alfa, 1989. Edícia drevárskej, celulózsárskej a papiernickej literatúry. ISBN 80-05-00116-9.

MELZEROVÁ, Lenka. Studie přetváření a porušování nosníků z lepeného lamelového dřeva. Vydání: první. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. 167 stran.

POŽGAJ, A. et al. (1997). Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vyd. Bratislava: Príroda a. s., 1997. 488 s. ISBN 80-07-00960-4

POŽGAJ, Alexander. Metódy zisťovania mechanických vlastností dreva a drevných veľkoplošných kompozitných materiálov = Náuka o dreve. 3. vyd. Zvolen: Vysoká škola lesnícka a drevárska, 1987.

POŽGAJ, Alexander. Štruktúra a vlastnosti dreva. 1. BRATISLAVA: PRÍRODA, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

SANDBERG, Dick, Manja KITEK KUZMAN a Milan GAFF. Engineered wood products: wood as an engineering and architectural = Kompozitní materiály na bázi dřeva : dřevo jako kompozitní a konstrukční materiál. České vydání. Prague: Czech University of Life Sciences, Faculty of Forestry and Wood Sciences, 2018. ISBN 978-80-213-2869-3.

STRAKA, Bohumil a Ladislav BUKOVSKÝ. Navrhování dřevěných konstrukcí. Brno: CERM, 1996. ISBN 80-7204-015-4.

SVITÁK, Martin. Zesilování dřevěných nosníků metodou aplikace vláken s vysokou pevností: = Reinforcement of wood beams using high strength fiber application. Praha, 2013. Vedoucí práce Štefan Barčík.

ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila a Libuše GANDELOVÁ. Stavba dřeva. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2002. ISBN 80-7157-636-0.

Internetové publikace a zdroje

DEJMAL A, Modifikace dřeva: Učební texty. [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z WWW: https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_NMS/Povinne_predmety/Modifikace_dreva/HUD%20MOD%20text%202017.pdf

KOŘÍNEK, Z. 2. vlákna [online]. Nedatováno. 57 stran. [cit. 2020-4-28]. Dostupné z WWW: https://drive.google.com/file/d/0B8vQSuH1vI_vV115RHg1SIFPNW8/view

MAR-BAL. History of Composite Materials [online]. Nedatováno.[cit. 2020-5-10]. Dostupné z WWW: <https://www.mar-bal.com/applications/history-of-composites/>

NENADÁLOVÁ, Šárka. PERMEABILITA UHPTRC [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <<https://theses.cz/id/0x4ew6/>>. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze.

SVOBODA, L. et al. 2018. Stavební hmoty. 4. vydání. ISBN 978-80-260- 4972-2. [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z WWW: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh>

POLLMEIER. About BauBuche [online]. Nedatováno.[cit. 2020-5-19]. Dostupné z WWW: <https://www.pollmeier.com/products/baubuche-about>

TIPPNER, Jan. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, eLearningová opora, [online]. 2007 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z WWW: https://is.mendelu.cz/eknihovna/slozky_objekty.pl?slozka=42;zobrazit=554;typ=opora

Odborné články

BABIAK, M. & GAFF, M. & SIKORA, A. & HÝSEK, Š. (2018). Modulus of Elasticity in Three- and Four-Point Bending of Wood. *Composite Structures*. 204. [online]. 2018 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.113>

GÁBORÍK, J., GAFF, M., RUMAN, D., ZÁBORSKÝ, V., KAŠÍČKOVÁ, V., & SIKORA, A. (2016). Adhesive as a Factor Affecting the Properties of Laminated Wood. *Bioresources*. [online]. 2016 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.10565-10574>

GAFF, M. & BABIAK, M. & VOKATÝ, V. & GAŠPAŘÍK, M. & RUMAN, D. (2017). Bending characteristics of hardwood lamellae in the elastic region. *Composites Part B: Engineering*. 116. 61-75. [online]. 2017 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.058>

GAFF, M. & GAŠPAŘÍK, M. & BABIAK, M. & VOKATÝ, V. (2017). Bendability characteristics of wood lamellae in plastic region. *Composite Structures*. 163. 410-422. [online]. 2017 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.052>

GAFF, M. & GAŠPAŘÍK, M. & BORŮVKA, V. & HAVIAROVA, E. (2015). Stress simulation in layered wood-based materials under mechanical loading. *Materials and Design*. 87. 1065-1071. [online]. 2015 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.128>

GAFF, M. & GAŠPAŘÍK, M. (2015). Effect of Cyclic Loading on Modulus of Elasticity of Aspen Wood. *Bioresources*. 10. 290-298. [online]. 2015 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://doi.org/10.15376/biores.10.1.290-298>

GAFF, M. & GAŠPAŘÍK, M. (2015). Influence of densification on bending strength of laminated beech wood. *Bioresources*. 10. 1506-1518. [online]. 2015 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://doi.org/10.15376/biores.10.1.1506-1518>

GAFF, M. & SVOBODA, T.. (2016). Principy úpravy vrstevovitých materiálů cílených vlastností. [online]. 2016 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10141.31203>

GAŠPAŘÍK, M. & GAFF, M. & BABIAK, M. (2017). Tension stress simulations of layered wood using a finite element method. *Wood research*. 62. 517-528. [online]. 2017 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z WWW: https://www.researchgate.net/publication/319954003_Tension_stress_simulations_of_layered_wood_using_a_finite_element_method

ROCA, P. & LOURENCO, P. & GAETANI, A. (2019). Historic Construction and Conservation: Materials, Systems and Damage. [online]. 2019 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9780429052767>

SIKORA, A. & GAFFOVÁ, Z. & RAJNOHA, R. & ŠATANOVÁ, A. & KMINIAK, R. (2017). Deflection of Densified Beech and Aspen Woods as a Function of Selected Factors. *Bioresources*. 12. 3192-3210. [online]. 2017 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3192-3210>

SVOBODA, T. & GAFFOVÁ, Z. & RAJNOHA, R. & ŠATANOVÁ, A. & KMINIAK, R. (2017). Bending Forces at the Proportionality Limit and the Maximum – Technological Innovations for Better Performance in Wood Processing Companies. *BioResources*. 12. 4146-4165. [online]. 2017 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.4146-4165>

SVOBODA, T. & SIKORA, A. & ZÁBORSKÝ, V. & GAFFOVÁ, Z. (2019). Laminated Veneer Lumber with Non-Wood Components and the Effects of Selected Factors on Its Bendability. *Forests*. 10. [online]. 2019 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/f10060470>

ŠILHAN, O. Zesilování stavebních konstrukcí dodatečnou lepenou kompozitní výztuží. *Časopis Stavebnictví* [online]. 2008, 06 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z WWW: http://www.casopisstavebnictvi.cz/zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi_A1126_I21

WEHSENER, J. & BRISCHKE, Ch. & HARTIG, J. & MEYER-VELTRUP, L. & HALLER, P. (2016). THERMALLY AND THERMO-MECHANICALLY TREATED WOOD FOR OUTDOOR APPLICATIONS – BENDING STRENGTH, STRUCTURAL INTEGRITY AND SET RECOVERY. [online]. 2016 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z WWW: https://www.researchgate.net/publication/309809932_THERMALLY_AND_THERMO-MECHANICALLY_TREATED_WOOD_FOR_OUTDOOR_APPLICATIONS_-_BENDING_STRENGTH_STRUCTURAL_INTEGRITY_AND_SET_RECOVERY

WEI, P. & WANG, B. & ZHOU, D. & DAI, Ch. & WANG, Q. & HUANG, S. (2013). Mechanical Properties of Poplar Laminated Veneer Lumber Modified by Carbon Fiber Reinforced Polymer. *Bioresources*. 8. 4883-4898. [online]. 2013 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.4883-4898>

Normy

ČSN EN 14080. Dřevěné konstrukce - Lepené lamelové dřevo a lepené rostlé dřevo – Požadavky. Český normalizační institut. 2013: 88

ČSN EN 313-1. Překližované desky – Klasifikace a terminologie – Část 1: Klasifikace. Český normalizační institut. 1999: 7

ČSN EN 14279+A1. Vrstvené dřevo (LVL) – Definice, klasifikace a specifikace. Český normalizační institut. 2009: 21

8 Přílohy

Příloha A Technický list AG – COLL 8761 D3

Příloha B Technický list SikaWrap 150 c30

Příloha C Duncanův test – modul pružnosti

Příloha D Duncanův test – mez úměrnosti

Příloha E Duncanův test – pevnost v ohybu