

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Využití softwarových nástrojů při posuzování
mechanických vlastností vrstvených materiálů**

Bakalářská práce

Autor: Michal Horáček

Vedoucí práce: Ing. Adam Sikora

Konzultant práce: doc. Ing. Milan Gaff, Ph.D.

2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Michal Horáček

Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu

Název práce

Využití softwarových nástrojů při posuzování mechanických vlastností vrstvených materiálů.

Název anglicky

Use of software tools in the assessment of mechanical properties of layered materials.

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je zhodnocení vlivu vybraných faktorů, jako druh dřeviny (Buk), tloušťka materiálu (5 a 9 mm), použitý nedřevní komponent (Laminát) a jejich slepení na základní mechanické charakteristiky zjišťované tří-bodovým ohybem (modul plasticity) rostlého dřeva spolu s nedřevním komponentem a vrstveného dřeva spolu s nedřevním komponentem s následným využitím simulačního softwaru pro vyhodnocení vybrané charakteristiky.

Metodika

1. Analýza literárních zdrojů s následným teoretickým rozbořem dané problematiky.
2. Příprava zkušebních těles a jejich testování
3. Statistické vyhodnocení získaných dat
4. Zhodnocení výsledků spolu s diskusí
5. V závěru popsat přínos pro vědu a pro praxi

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

Buk, vrstvené dřevo, nedřevní komponent, mechanické vlastnosti, ohybové charakteristiky, modul plasticity

Doporučené zdroje informací

SANDOZ, J.L. (2009) Industrial ultrasonic grading formulti-glued laminated timber.

Études&constructionsbois. Conceptbois technologie, 7 p.,

SHUKLA, S.R., KAMDEM, D., P. (2008) Properties of laminated veneer lumber (LVL) made with low density hardwood species: effect of the pressured uration. In: Holz Roh Werkst., 2008, 66, p. 119-127, ISSN 0018-3768.

SMARDZEWSKI, J. (2007) Komputerowo zintegrowane wytwarzanie mebli. PWRiL, Oddział w Poznaniu, Poznan, 306 s., ISBN 978-83-09-01015-9.

SOINE, H. (1995) Holzwerkstoffe. Herstellung und Verarbeitung. Leinfelden – Echterdingen, DRW –Verlag, 366 s.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Adam Sikora

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 13. 3. 2019

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 15. 04. 2019

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Využití softwarových nástrojů při posuzování mechanických vlastností vrstvených materiálů vypracoval samostatně pod vedením Ing. Adama Sikory, 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 její obhajoby.

V Praze dne.....

Podpis autora.....

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Adamu Sikorovi a doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. za podnětné rady a připomínky, které mi pomohly ke zpracování této bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je shrnout poznatky o tříbodovém ohybu a charakteristikách, které lze ze silovo-průhybového diagramu získat. Teoretická část se zabývá mechanismy softwarových nástrojů, vyhodnocením tříbodového ohybu a možnostmi zpracování dat. Dále se práce věnuje konkrétním vlastnostem lamelovaného dřeva a vyztužování nedřevěnými komponenty. Praktická část se zaměřuje na testování vzorků vrstveného a nevrstveného buku lesního (*Fagus sylvatica* L.). Všechny testované lamely se podleply skelným vláknem za přispění PVAC lepidla, následně se vzorky rozdělily se do čtyř skupin. Dvě skupiny měly tloušťku 5 mm a 9 mm, další dvě lamelované skupiny vykazovaly hodnoty 10 mm a 17,6 mm po slepení. Závěrem se porovnávaly hodnoty pro vrstvený a nevrstvený materiál mezi sebou. Výsledky potvrzují, že hodnoty modulu plasticity jsou v obou případech vyšší u lamelovaných vzorků než u vzorků nelamelovaných. Je patrné, že se chord modul zvyšoval s narůstající tloušťkou, nicméně z dat vyplývá, že jen do určité míry. Při porovnání vzorků 5 mm a 10 mm nárůst hodnot chord modulu představoval 2,35 %. Pro hodnoty 9 mm a 17,6 mm bylo navýšení už jen 0,56 %, z čehož lze předpokládat snižující se tendenci.

Klíčová slova: buk, vrstvené dřevo, nedřevní komponent, ohybové charakteristiky, modul plasticity

Abstrakt v cizím jazyce

This bachelor thesis is aimed at summarizing the knowledge of three-point bending and characteristics that can be obtained from the force-strain diagram. The theoretical part focused on software tools and methods of the evaluation of a three-point bending and a data processing approach. Furthermore, attention was also paid to the properties of laminated wood and reinforcement of non-wood components. The practical part of the thesis focused on testing laminated and non-laminated samples of European beech (*Fagus Sylvatica* L.). All lamellas were glued with glass fibre by PVA glue and consequently divided into four groups. The two groups had a thickness of 5 mm and 9 mm, the other two lamellated groups had values of 10 mm and 17,6 mm after glueing. Finally, values for laminated and non-laminated material were compared with each other. The results confirm that the observed property of the plasticity modulus in both cases is higher in the case of lamellar wood. It is evident that the chord modulus increased with increasing thickness, but the tendency is apparent only to some extent. Comparing specimens of 5 mm and 10 mm, the increase of chord modulus values was 2,35 %. Values of 9 mm and 17,6 mm resulted in even less pronounced figure of 0,56 %, from which a decreasing tendency might be expected.

Keywords: Oak, Laminated Wood, Non-wood Component, Bending Characteristics, Modulus of Plasticity

Obsah

1.	Úvod	13
2.	Cíle práce	14
3.	Využívání softwarových nástrojů při posuzování mechanických vlastností dřeva a materiálů na jeho bázi	15
3.1.	Software	15
3.1.1.	Analytické programy pro mechanické zkoušky	15
3.1.2.	Modelovací a simulační programy	16
3.2.	Mechanismy softwarových nástrojů	16
3.2.1.	Vyhodnocování na základě konečných prvků	16
3.2.2.	Principy analýzy rozptylu dat	17
3.3.	Historie sběru dat	17
4.	Mechanické vlastnosti	19
4.1.	Charakteristiky vyplývající ze silově-deformačního diagramu	19
4.1.1.	Modul plasticity	20
4.1.2.	Mez úměrnosti	21
4.1.3.	Modul pružnosti	21
4.1.4.	Aproximace	22
4.1.5.	Elastická práce	22
4.1.6.	Elastický potenciál	23
4.1.7.	Mez pevnosti	23
4.1.8.	Pevnost dřeva v tlaku	24
4.1.9.	Pružnost dřeva	24
4.2.	Pevnost dřeva	25
4.2.	Anizotropie dřeva	25
4.2.1.	Mechanické namáhání	28
4.2.2.	Trojrozměrný Hookův zákon	28

4.4.	Fyzikální vlastnosti dřeva.....	30
4.4.1.	Hustota dřeva.....	31
4.4.2.	Vlhkost dřeva	31
5.	Vrstvené materiály.....	33
5.1.	Historie lamelovaných materiálů	33
5.2.	Vrstvení lamel	33
5.3.	Vlastnosti vrstvených materiálů.....	34
6.	Vyztužování vrstvených materiálů	36
6.1.	Typy vláken.....	37
6.1.1.	Forma použití vláken.....	38
6.1.2.	Vyztužení LVL uhlíkovými vlákny	39
6.1.3.	Další vrstvené materiály.....	39
6.2.	Lepidla.....	40
7.	Metodika.....	41
7.1.	Tvorba zkušebních těles.....	41
7.1.1.	Třídění a značení vzorků	41
7.1.2.	Lepení zkušebních vzorků.....	42
7.2.	Mechanické testování.....	44
7.2.	Výpočet sledovaných charakteristik	47
7.3.	Zpracování naměřených dat	49
8.	Výsledky a diskuse	50
8.1.	Chord modul.....	51
8.2.	Mez pevnosti	52
8.3.	Střední hodnota	53
8.4.	Mez úměrnosti.....	54
9.	Diskuse	55
10.	Závěr.....	56

Seznam literatury a použitých zdrojů.....	57
---	----

Seznam ilustrací

Obrázek č.1 Náhodné datové body a jejich lineární regrese.....	17
Obrázek č. 2 Záznam hodnot silovo-průhybového diagramu	18
Obrázek č. 3 Vztah mezi napětím a deformací při krátkodobém zatížení u smrkového dřeva	20
Obrázek č. 4 Chord modul s hraničními prvky	22
Obrázek č. 5 Roviny pružné symetrie dřeva	26
Obrázek č. 6 Diagram anizotropie modulu pružnosti	27
Obrázek č. 7 Vztah tahového a tlakového napětí	36
Obrázek č. 8 Kódování vzorků	41
Obrázek č. 9 Lepení vzorků	42
Obrázek č. 10 Lepení skelné tkaniny	43
Obrázek č. 11 Použitá skelná tkanina	43
Obrázek č. 12 Měřicí stroj TIRA test 2850 S	44
Obrázek č. 13 Uspořádání ohýbacího zařízení	45
Obrázek č. 14 Vkládání vzorku na podpěry.....	46
Obrázek č. 15 Sušárna Binder ED 23	47
Obrázek č. 16 Mez pevnosti.....	4752
Obrázek č. 17 Střední hodnota	47
Obrázek č. 18 Mez úměrnosti	54

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 Přehled průměrných hodnot připravených vzorků	44
Tabulka č. 2 Průměrné naměřené hodnoty.....	50
Tabulka č. 4 Duncanův test pro chord modul	63
Tabulka č. 5 Duncanův test pro mez pevnosti	63
Tabulka č. 6 Duncanův test pro střední hodnotu	64
Tabulka č. 7 Duncanův test pro pro mez úměrnosti	64
Tabulka č. 8 Konečný test významnosti pro chord modul.....	65
Tabulka č. 9 Konečný test významnosti pro mez pevnosti.....	65
Tabulka č. 10 Konečný test významnosti pro střední hodnotu	65
Tabulka č. 11 Konečný test významnosti pro mez úměrnosti	66

Seznam použitých zkratek

BK – Buk lesní (*Fagus sylvatica L.*)

ČSN – česká státní (technická) norma

EN – evropská norma

LR – radiální rovina

LT – tangenciální rovina

LVL – (Laminated Veneer Lumber) – vrstvené dřevo

MKP – metoda konečných prvků

MOE – (Modulus of Elasticity) modul pružnosti

MOR – (Modulus of Rupture) modul roztržení

PVAC – polyvinilacetát (lepidlo)

RT – příčná rovina

Tex. - jednotka jemnosti příze

1. Úvod

V současné době jsou kladeny větší a větší nároky na využívání obnovitelných zdrojů s ohledem na zachování ekologické podstaty materiálu. Z těchto důvodů je zvýšený tlak na tvorbu nových materiálů na bázi dřeva. Dřevo splňuje jako organický materiál nároky jak na ekologičnost, tak na obnovitelnost. Stále je to však nehomogenní materiál, který vykazuje, ve velké míře, anizotropní vlastnosti. Tyto nestejnorodé charakteristiky nepředurčují dřevu hojné využití. Ve snaze eliminovat negativní vlastnosti a posílit právě vlastnosti pozitivní, vznikají materiály na bázi dřeva. U takového materiálu je možné nestejnorodé vlastnosti odkrýt, zohlednit je, a v dalším použití eliminovat tak, aby výsledný produkt byl charakteristický ještě lepšími vlastnostmi než jeho vstupní části. Dnes již máme vlastnosti pro běžně využívané dřeviny seskupeny do pevnostních tabulek s neustálým nárůstem naměřených dat. Proto před použitím jakékoli dřeviny nemusíme provádět měření na námi vybraném vzorku.

Mezi nově vznikající produkty patří i materiály vrstvené, u kterých jsou vysoké nároky na skladbu v celém průřezu. Pomocí úpravy složení hmoty je u výrobků možné dosáhnout požadovaných mechanických vlastností. K jejich zhotovení je důležité znát jejich mechanické vlastnosti a chování materiálu při zátěži jako celku. Při testování dochází ke značné spotřebě vzorků, samotný proces testování je navíc jak časově, tak i finančně nákladný. Z těchto důvodů se objevují tendence nahrazení těchto vzorků počítačovou simulací pracující na základě metody konečných prvků.

2. Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je obsáhnout teoretickou část nezbytnou pro problematiku měření mechanických vlastností dřeva a materiálů na jeho bázi. Proto se nezanedbatelná část věnuje jednotlivým vlastnostem a jejich významu pro měření. Dále se práce zabývá softwarovými nástroji a jejich principy při posuzování mechanických vlastností buku a vrstvených materiálů. Pro konkrétní demonstraci je v tomto textu zmíněno několik specifických programů, které se při měření dřevních i nedřevních komponentů využívají k exaktnímu zpracování dat.

Hlavní měřenou hodnotou jsou především vlastnosti silově deformační křivky a vlastnosti z ní vyplývající: modul pružnosti, mez pevnosti, mez úměrnosti a modul plasticity. Prakticky se bude hodnotit vliv vybraných faktorů jako je druh dřeviny (buk), tloušťka materiálu (5 mm a 9 mm) a použitý nedřevní komponent (laminát). Data podléhají determinaci těchto mechanických charakteristik, tříbodového ohybu a modulu plasticity.

Jako podklady pro analýzu budou sloužit data naměřená na vybraných vzorcích buku lesního (*Fagus sylvatica L.*), který vyniká, pro dřevozpracující průmysl, vhodnými vlastnostmi. Díky skelným vláknům můžeme dnes využít i materiál s horšími pevnostními vlastnostmi, který byl dříve určen k palivovým účelům.

V rámci vyhodnocení byla provedena analýza dat v programu Matess. Tento program je vyvíjený ve spolupráci s Českou zemědělskou univerzitou v Praze a zabývá se zpracováním dat na základě metody konečných prvků. K vyhodnocení dat je použit program Statistica 2015, výsledky jsou následně shrnuty v závěru. Výsledky by mohly potvrdit nebo vyvrátit některá tvrzení na základě naměřených hodnot ve dřevařském průmyslu.

3. Využívání softwarových nástrojů při posuzování mechanických vlastností dřeva a materiálů na jeho bázi

Využívání příslušného softwaru a jeho mechanismů je dnes nedílnou součástí procesu výzkumu. Odpovídající programy představují empirickou a technickou kvalitu na mnoha úrovních bádání. Součástí vyhodnocení naměřených dat je nejen reponování o sledované charakteristice, ale i o možnostech chyby. Tomuto konkrétnímu hledisku se však blíže věnují statistické a analytické programy (Jusheng a Nan, 1993).

Proces testování začíná stanovením záměru a cílů studie, uvádí se záběr testování a testovací forma. Jinými slovy je nezbytné definovat jaká specifika budou sledována, které testovací metody se jeví jako nejvhodnější, a následně určit žádoucí program. Je také nutné stanovit podmínky, za kterých je možné kontrolovat plnění úkolů a průběh měření. Finální částí procesu je samotný sběr dat (Witkowski a kol., 2015).

3.1. Software

Téma zpracování dat z hlediska softwarového přístupu dat rozlišuje dva hlavní přístupy. Zaprvé jsou to programy analytické, které se zabývají detailním zkoumáním jednotlivých vlastností a jsou nástrojem pro zpřesnění charakteristik dřeva a materiálů na jeho bázi.

Druhým typem je členění se na základě přístupu k samotnému vyhodnocování. Velmi rozšířené jsou modelovací programy, které na základě zmapovaných charakteristik sledují mechanické vlastnosti (Hu a Guan, 2017).

3.1.1. Analytické programy pro mechanické zkoušky

Prvním způsobem, jak se zabývat touto problematikou, je vývoj programu s velkou citlivostí k naměřeným datům. Základní analytické programy měří sílu při 10 % a 40 %. Z těchto dat se pak vychází při kalkulaci modulu pružnosti. Data jsou analyzována na základě metody hraničních hodnot výsledným snímkem, který poskytuje detailní zachycení modulu pružnosti pro daný vzorek. Výhodou tohoto měření je podrobný záznam vzorku s velkými přesnostmi, díky kterým by se dal vzorek

zpětně modelovat (Brož a Procházka, 1987). Dnešní měřicí mechanismy jsou tak přesné, že se z naměřených hodnot může usuzovat v jakém čase a síle k porušení daného vlákna ve dřevě došlo. Nevýhodou těchto programů naopak je, že pracují především s přesnou analýzou reálného vzorku metodou, která je destruktivní, a při níž dochází k fyzickému znehodnocení finančně náročného vzorku.

3.1.2. Modelovací a simulační programy

Druhá metoda se zabývá softwarem, který řeší modelování na základě metody konečných prvků (MKP). Jako podklad pro výpočty slouží naměřené hodnoty mechanických charakteristik dřeva, které paušálně hodnotí dřevo jako nehomogenní materiál a povětšinou zohledňují i jeho nedostatky. Tyto programy jsou spíše určené k modelování. Používají se nejen pro dřevěné konstrukce, ale i pro jiné materiály jako jsou kovy, kompozity a jiné. Trh nabízí nepřeberné množství těchto systémů, které jsou schopné pracovat s MKP jako například Cosmos nebo Marc (Jusheng a Nan, 1993).

V českém prostředí je metoda konečných prvků stavebním kamenem softwarového programu RFEM (Dlupal, 2019). Program řeší statické výpočty nosných konstrukcí a názorně zobrazuje jednotky vnitřní síly, deformace, napětí plochy či napětí v tělese, ale také statické či dynamické vlastnosti konstrukcí, a to rozličných materiálů (Brožovský a Materna, 2012).

Softwarové programy, které se zabývají analýzou třibodového ohybu a jeho vyhodnocení na základě vyhodnocení metodou konečných prvků: Ansis, Elmer, Matlab, SolidWorks další programy jsou zmíněny v příloze číslo 6.

3.2. Mechanismy softwarových nástrojů

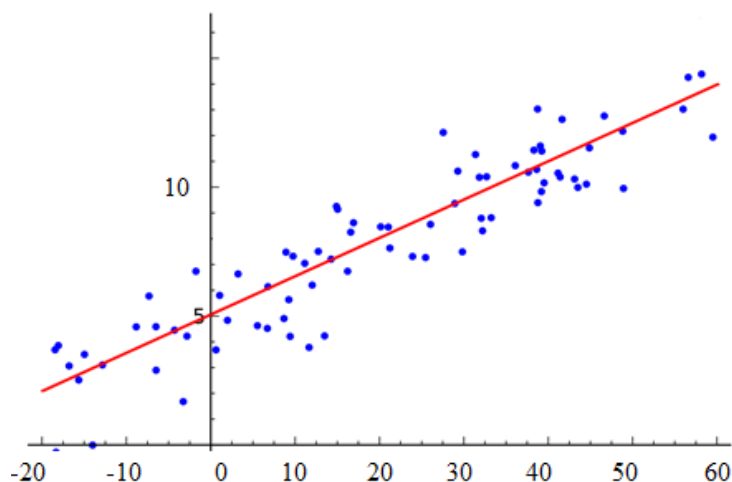
3.2.1. Vyhodnocování na základě konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) je relativně nová numerická metoda, která současně mezi jinými principy dominuje. MKP nabízí způsob, jak demonstrovat průběh určitých jevů konkrétního materiálu. Samotný princip vychází z učení především Langrangeova a definuje pružnost a celkovou strukturu navržených zařízení.

Aplikace tohoto fyzikálního modelu se uvádí do praxe zpravidla jako kontrola konkrétních mechanismů nebo jako indikátor nejnamáhavějšího bodu materiálu (Kolář, 1972). Výhodou je především univerzálnost metody, nejenže definuje záležitosti pružnosti a dynamiky, ale její variace dávají odpovědi na otázky ohledně proudění kapalin a plynů, záření, akustiky, ale třeba i vedení tepla (Brožovský a Materna, 2012; Fusek a Halama, 2011).

3.2.2. Principy analýzy rozptylu dat

Analýza rozptylu je metoda využívající rozdělené odchylky v zadané proměnné na jednotlivé složky, které lze přidělit různým zdrojům variací. Analýza rozptylu používá stejný koncept jako lineární regrese, (viz. Obr. 1). Rozdílem je označení proměnných, kde jsou změněny kvantitativní faktory za kvalitativní (Meloun a Militký, 1995).



Obrázek č.1 Náhodné datové body a jejich lineární regrese (inspirováno SANDOZ a kol., 2000)

3.3. Historie sběru dat

Ohýbat tělesa se člověk pokoušel již od pradávna. Využíval trojbodový ohyb v konstrukcích staveb bez jakýchkoli hlubším poznatku o něm. Na počátku dvacátého století se začíná s testováním dřeva a materiálů na jeho bázi. Pro potřeby těchto testů se začíná přizpůsobovat vybavení i metodika pokusů. V roce 1928 byla založena

Československá normalizační společnost (ČSN) za účelem sjednocení používaných norem a zvýšení kvality výrobků. Nedlouho na to byly vytvořeny i zavazující soubory doporučení zabývající se normami dřeva i materiály na jeho bázi. Stěžejní norma, ze které se vychází při měření tříbodového ohybu se jmenuje EN 310 a byla vytvořena v roce 1993.



Obrázek č. 2 Záznam hodnot silovo-průhybového diagramu

V době vzniku normy EN 310 probíhala většina měření na mechanických univerzálních strojích. Takovýto stroj zaznamenával data tužkou na milimetrový papír. Měřicí mechanismus se posouval a zaznamenával tak napětí v čase (viz. Obr. č.2). Výsledná data se pak musela dále fyzicky vyhodnocovat. Dnes již zastaralou metodu nahrazují digitální měřicí systémy.

4. Mechanické vlastnosti

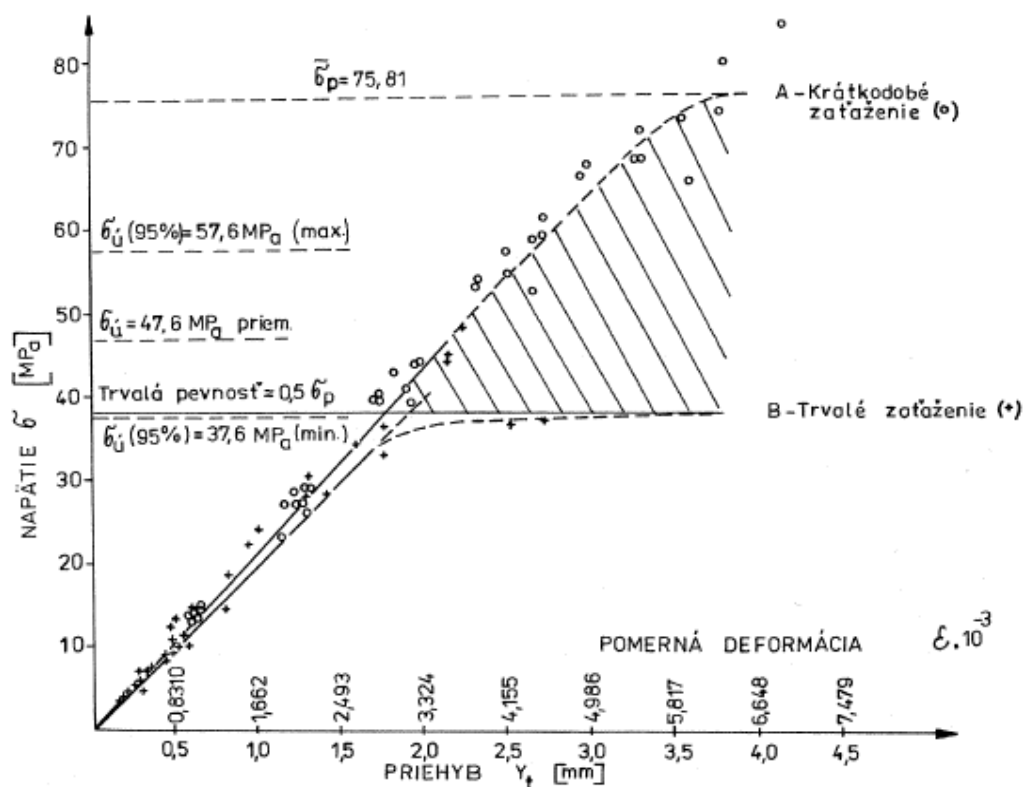
Mechanické vlastnosti dřeva charakterizují schopnost dřeva a materiálů na bázi dřeva odolávat účinkům vnějších sil. Mezi konkrétní mechanické vlastnosti řadíme pevnost, pružnost (deformovatelnost), tvrdost, houževnatost a technologické vlastnosti dřeva a materiálů na jejich bázi (Matovič, 1993).

Mechanické vlastnosti ovlivňují procesy při zpracování dřeva jako řezání, sušení, ohýbatelnost, štípatelnost, lisování a další. Proto je důležité s mechanickými vlastnostmi dobře pracovat, aby se mohla optimalizovat výroba, a tím snižovat náklady. Vlastnosti dělíme dle jejich charakteru na fyzikální, fyzikálně-chemické a mechanické. Mechanické se dále dělí na základní: drsnost, tuhost, houževnatost, plasticitu a odvozené vlastnosti: tvrdost, odolnost vůči tečení dřeva a odolnost vůči únavovému lomu. Poslední skupinou jsou technologické vlastnosti. Do této skupiny řadíme především vlastnosti spojené s obráběním dřeva: sušitelnost, spojovatelnost, štípatelnost, impregnovatelnost, ohýbatelnost (Matovič, 1993).

4.1. Charakteristiky vyplývající ze silově-deformačního diagramu

Při zkoumání mechanických vlastností dřeva se dostávají do popředí vztahy základních veličin, kterými jsou: napětí, deformace a změny v čase (Babiak a Dubovský, 2001).

Pro kvalitní softwarové vyhodnocení silově-průhybového diagramu je zásadní znát všechny parametry, které mohou být vyhodnocovány. Pro mnohé údaje je nezbytné experimentální měření, protože pro mnohé z nich stále nejsou adekvátní odvozené rovnice (Gendelová a Horáček, 2009).



Obrázek č. 3 Vztah mezi napětím a deformací při krátkodobém zatížení u smrkového dřeva (Požgaj, 1997)

4.1.1. Modul plasticity

Modul plasticity je vztah mezi napětím a silou v určitém bodě křivky mezi mezi úměrnosti a mezi pevnosti. U nekomplikovaného namáhání se pro získání výsledku modulu plasticity odečte od síly meze pevnosti síla meze úměrnosti a výsledek se vydělí rozdílem protažení meze pevnosti a protažením mezi úměrnosti (Gaff s kol., 2017).

4.1.2. Mez úměrnosti

Napětí, které odpovídá bodu odklonu od lineární přímky se nazývá mez úměrnosti. Tento bod označuje stav, kdy ještě nevznikla plastická deformace (Požgaj, 1997), která představuje přibližně 70 % meze pevnosti (Perelygin, 1965). Síla na mezi úměrnosti dřeva proto může být definována jako mez, na které dřevo začíná vyvíjet elastickou deformaci (Mackes a Lynch, 2001).

Při překročení meze úměrnosti se lineární úsek napětí odkloní a přechází do nelineární podoby. Důsledkem odklonu je nárůst plastických deformací a deformací pružných v čase. Na diagramu (viz. obr. č. 5) vidíme klasickou plastickou deformaci dřeva. Tento postup je technicky a finančně náročný, zde uvedené informace se vztahují především ke krátkodobému zatížení. Při dlouhodobém zatížení se dřevo chová jako vysokoelastický materiál, a i pod mezí úměrnosti vznikají kromě pružných deformací i deformace pružné v čase a deformace plastické (Požgaj, 1997).

S tloušťkou materiálu mez úměrnosti klesá (Gaff a kol, 2017 ^A). Výsledky výzkumu Sikory a kol. (2017) naznačují, že odchylka meze úměrnosti je ovlivněna mimo jiné jak výběrem dřeva, tak šířkou vzorku.

$$\sigma_w = \frac{3F_{mez} l}{2bh^2} \quad (1)$$

Kde:

Σ_m - napětí na mezi úměrnosti (MPa)

F_{mez} – síla na mezi úměrnosti (N)

l – vzdálenost středů podpěr (mm)

h – výška zkušebního tělesa (mm)

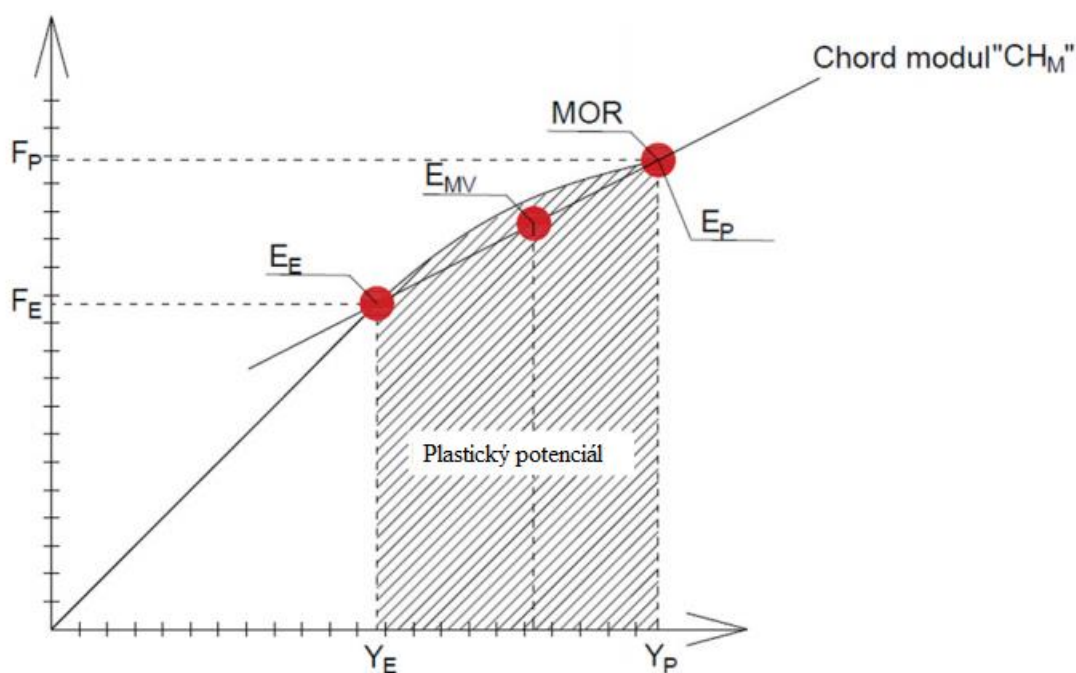
b – šířka zkušebního tělesa (mm)

4.1.3. Modul pružnosti

Jednou z vyplývajících charakteristik je modul pružnosti (značeno též jako MOE – Model of Elasticity) definující vnitřní odpor dřeva kladený působené síle. Při zvýšené hustotě je odpor vyšší a materiál méně poddajný (Kafka, 1989). Hodnoty modulu pružnosti mají zvyšující se tendenci spolu s tloušťkou materiálu,

oproti tomu hodnoty meze úměrnosti a elastického potenciálu klesají. Nárůst hodnot elastického potenciálu a meze úměrnosti se může projevovat kvůli uvolnění vazeb mezi komponenty ligninu a celulózy (Gaff a kol, 2017).

Gendelová (2012) uvádí, že modul pružnosti v ohybu se mění s vlhkostí. Při změně vlhkosti se hodnota modulu pružnosti změní o 1 % v tahu a tlaku, ve směru vláken se pak změní o 2 %. Pro výpočet byl upotřeben vzorec, který udává norma ČSN 490147.



Obrázek č. 4 Chord modul s hraničními prvky (zdroj: Sikora a kol., 2018)

4.1.4. Aproximace

Vzhledem k tomu, že tříbodový ohyb je relativně komplexní namáhání, pro jeho výpočet je vhodné použít aproximaci, která využívá linearizaci parabolické části křivky diagramu napětí-deformace (Gaff s kol., 2017).

4.1.5. Elastická práce

Elasticita, pružnost nebo také flexibilita je vlastnost materiálu pružně se deformovat do momentu zlomení vzorku. Z fyzikálního hlediska je elasticita změnou materiálu, ke které dochází pod vlivem mechanických sil projevujících se deformací

objemu. Svoboda a kol. (2019) uvádí, že míra elasticity se zvyšuje spolu s namáháním. Naproti tomu plasticita je schopnost materiálu měnit svůj tvar v pevném stavu kvůli působení vnějších sil, a to bez zlomení. Stupeň plasticity při mechanickém namáhání se nazývá plastická deformace. Fyzikální charakter plasticity se liší materiál od materiálu (Svoboda a kol., 2019).

4.1.6. Elastický potenciál

Namáhání pevného tělesa je doprovázeno akumulací jeho elastického potenciálu deformace. V určitém okamžiku však materiál není schopný hromadit více energie a dochází k hraničnímu stavu, kdy může dojít k plastické deformaci, zlomení nebo jinému stavu vedoucímu ke změnám mechanických vlastností materiálu. Konkrétní limit elastického potenciálu závisí na formě a podmínkách napětí (Prasolov, 1991).

Elastický potenciál se s nárůstem tloušťky materiálu významně snižuje. Pro jednoosé zatížení je výpočet elastického potenciálu založen na napětí (σ) a modulu pružnosti (E) (Gaff a kol, 2017^A).

4.1.7. Mez pevnosti

Mez pevnosti je takové napětí ve dřevě, při kterém se poruší soudružnost dřeva. Vyjadřuje se napětím na mezi pevnosti. Mez pevnosti je tedy bod, který udává pevnost materiálu v okamžiku, který předchází porušení (Babiak a Dubovský, 2001). Gáborík a kol. (2011) poskytuje vhodnou rovnici pro výpočet síly na mezi pevnosti v ohybu při trojbodovému ohýbání.

$$\sigma_{12} = \sigma_w \cdot [1 + \alpha \cdot (w - 12)] \quad (2)$$

Kde:

σ_{12} – síla na mezi pevnosti v ohybu dřeva při 12 % vlhkosti, MPa,

σ_w - síla na mezi pevnosti v ohybu dřeva v určitém bodě obsahu vlhkosti, MPa,

w - vlhkost zkušebního vzorku během testování, %,

α - faktor korekce vlhkosti, který je 0,04 pro všechny dřeviny.

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou převedeny na sílu mezi pevnosti v ohybu při 12 % vlhkosti zaokrouhлено na 1 MPa.

Výsledky ukazují, že zvýšení tloušťky způsobuje snížení pevnosti v ohybu. Snížení meze pevnosti v ohybu není podle našeho názoru způsobeno tloušťkou vzorku, ale rozdílnou délkou vzorku (Gaff a kol., 2014; Stark, 1997). Při srovnání jednotlivých výsledků lze obecně konstatovat, že hodnoty meze pevnosti v ohybu laminovaného dřeva jsou v průměru o 30 MPa nižší (Gaff a kol., 2014).

Z finálních hodnot lze vyvodit, že zvýšení tloušťky způsobuje snížení síly na mez pevnosti (Gaff a kol., 2014; Stark, 1997). Existuje domněnka (Gaff a kol., 2014), že tento pokles není způsoben tloušťkou vzorku, ale rozdílnou délkou.

4.1.8. Pevnost dřeva v tlaku

Při orientaci vláken rozlišujeme pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken a napříč vlákny v radiálním či tangenciálním směru (Požgaj, 1997).

Nejvýznamnější z hlediska pevnosti je pevnost v tlaku podél vláken. Tento jev předurčuje dřevu vysoké uplatnění ve stavebním průmyslu. Během působení na dřevo podél vláken dochází k deformaci, která se projeví zkrácením tělesa. Průměrná hodnota meze pevnosti v tlaku podél vláken je u dřeva s 12 % vlhkostí 50 MPa (Gandelová a kol., 2009).

Během namáhání dřeva napříč vlákny dochází k deformaci a zhušťování dřevní struktury. Díky tomuto jevu se obtížně určuje pevnost v tomto směru, a proto se přihlíží k mezi úměrnosti (Požgaj a kol., 1997).

4.1.9. Pružnost dřeva

Pružnost dřeva představuje schopnost dřeva po dočasném zatížení dosahovat původního tvaru. Jinak se dá také popsat parametry pracovního diagramu jako jsou energie pružné deformace (W_p), pružná deformace (ε_p) a mez úměrnosti (σ_u) (Gandelová a kol., 2009).

4.2. Pevnost dřeva

Pevnost dřeva je charakterizována jako míra největšího napětí, které je dřevo schopno odolávat bez zjevného porušení celistvosti materiálu. Členíme ji na pevnost v tlaku, tahu, ohybu, smyku a krutu (Požgaj a kol., 1997).

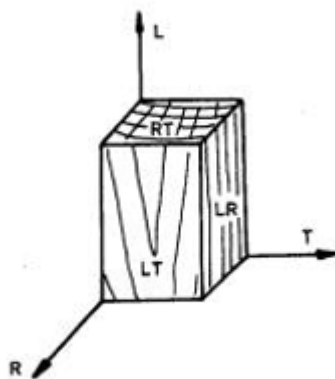
4.2. Anizotropie dřeva

Na dřevo, jako i na materiály na jeho bázi, musíme nahlížet jako na anizotropní materiál, který se vyznačuje tím, že má v různých směrech odlišné vlastnosti. Tento jev můžeme pozorovat například na dělení materiálu rovnoběžně nebo napříč osy kmene. Pro tuto práci je důležité definovat základní veličiny:

- 1) Skalární – Jedná se o veličiny reprezentované jediným číselným údajem jako např. čas či síla.
- 2) Vektorové – Jsou určeny velikostí a směrem v prostoru, pro jejich určení je nutné znát jejich souřadnice jako jsou síla, rychlost, moment síly a zrychlení.
- 3) Tenzorové – Určují vztah mezi dvěma vektory, můžeme na ně nahlížet také jako na počet hodnot složek rovných počtu os souřadné soustavy. Mezi zástupce se řadí koeficient tepelné vodivosti, tenzor elastických konstant a tenzor napětí. Počet složek tenzoru se zaznamená jako $m=3^n$, kde n reprezentuje řád tenzoru.

Anizotropii proto můžeme obsáhnout veličinami vyššími než 1 tenzor. Při seskupení bodů v jednu směru je viditelný trend a ten nazýváme hlavní směr (Požgaj a kol., 1997).

Specifickou částí, která ovlivňuje většinu vlastností dřeva je jeho anizotropní chování. Je zapříčiněno tvorbou atomů a molekul na chemické úrovni, které následně ovlivňují další úrovně. Výsledkem anizotropního chování nastávají rozdílné mechanické vlastnosti v závislosti na směru působení síly. Snižovat anizotropní chování a docílit izotropie se dřevařské odvětví snaží výrobou kompozitních materiálů. Tato snaha není zcela jednoduchá, protože i kovy, stejně tak jako dřevní hmota a kompozitní materiály, vykazují projevy anizotropního chování (Požgaj a kol., 1997).

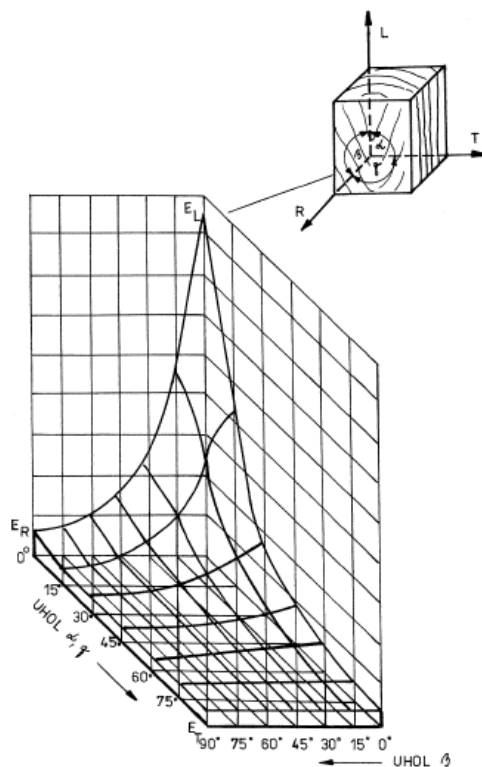


Obrázek č. 5 Roviny pružné symetrie dřeva (Kollman, 1959)

Různost mechanických vlastností v objemu dřeva a její závislost na směru nazýváme anizotropickou mechanickou vlastností (Požgaj a kol., 1997). Jak vidíme na obrázku č. 3, pružné deformace v objemu dřeva ukazuje na rozdíl ve třech vzájemně kolmých směrech, a to v axiálním, radiálním a tangenciálním (Kollman, 1959).

Z experimentálních šetření vyplývá, že pružnost a pevnostní vlastnosti jsou velmi odlišné, zejména podélně a kolmo na vlákna a v radiálním a tangenciálním směru. Tvar a uspořádání základních buněčných elementů dřeva a jejich směr mikrofibril ve středních vrstvách stěn S_2 jsou důvodem transversálno-axiální anizotropie s významným rozdílem mechanických vlastností (Kollman, 1959).

Působení kolmo na vlákna způsobuje větší deformace zploštěných buněk než při působení rovnoběžně s vlákny. Rozdíl vyplývá z vazbových energií chemického složení dřeva; v podélném směru jsou více namáhány kovalentní vazby a ve směru kolmém vodíkové můstky. Přítomnost dřevných paprsků a rozdíl mezi jarními a letními tracheidami způsobují tengenciálně-radiální anizotropii (Keylberth a Kolbmann, 1954; Ylinen, 1954).



Obrázek č. 6 Diagram anizotropie modulu pružnosti (Ashkenazy, 1980)

Pro konkrétní demonstraci: Matovič (1993) uvádí, že při odklonu vláken od podélné osy o 45° se sníží pevnost v ohybu o cca 20 %.

Rozlišujeme tři základní roviny pružné symetrie:

- 1) Příčná rovina (RT), která je kolmá na vlákna, přičemž se nehledí na změnu pružnostních a pevnostních vlastností po výšce kmene.
- 2) Radiální rovina (LR), kterou je možné brát jako rovinu symetrie pružnostních vlastností tehdy, je-li zakřivení ročních letokruhů zanedbatelné (poměr zakřivení r je větší než 10 cm).
- 3) Tangenciální rovina (LT), jedná-li se o tento typ roviny, dochází k opominutí změny pružných vlastností, a to v místě průměru dřeviny.

4.2.1. Mechanické namáhání

Při působení na vzorek tlakem vzniká ve dřevě napětí. Toto napětí je statické nebo měnící se s časem. Ve druhém případě se napětí nazývá dynamické. Kritéria, která ho ovlivňují, jsou: stav napětí a čas. Stav napětí definuje počet, druh a průběh napětí na objem dřeva. Je definován i z hlediska působení jako jednoosý, dvojosý a víceosý. Rychlost působení deformace dřeva je stejná jako šíření akustických vln ve dřevě, udává se v m/s – *pro modul E v MPa*. Mechanické namáhání je tudíž proces, při kterém vzniká interakce mezi mechanickými silami a dřevem. Jinými slovy se na dřevo působí silou nebo jiným činitelem a v závislosti na složení a struktuře dřeva, klade materiál odpor dané síle. Působením síly vznikají jako výsledek ve dřevě dočasné či trvalé změny tvaru. Mezi druhy namáhání se řadí: tah a tlak, smyk, ohyb, kroucení (Požgaj a kol., 1997).

Deformací se myslí změna rozměrů a tvaru dřeva působením sil, kdy dochází k prodloužení (normálové deformace) či zkrácení, ale může se projevit i změna tvaru. Zkosení dřeva při působení síly vzniká při tangenciálním napětí a nazývá se smykovou deformací (Gandelová a kol., 2009). Při namáhání dřeva silou závisí i na čase, po který je dřevo namáháno. Při dlouhodobém namáhání se deformace dřevních prvků zvětšuje i v situaci, kdy namáhání není konstantní. Veličiny, které ovlivňují deformaci, jsou; síla namáhání, počáteční vlhkost, relativní vlhkost a teplota prostředí (Kafka, 1989).

4.2.2. Trojrozměrný Hookův zákon

Během jednoosého zatížení vykazuje dřevo chování jako lineárně pružný materiál. Při pohledu na prostorové napětí je mezi ostatními zkouškami napětí a deformací lineární vztah. Aplikace Hookova zákona musí splňovat tyto základní podmínky:

- Mohou vznikat jen malé deformace do 1 %.
- Teplota materiálu by měla být konstantní a dřevo má mít stejnou hustotu.
- Mezi zkouškami nevzniká napětí v zadané rovině (Požgaj a kol., 1997).
- V tomto případě hustota představuje míru homogenity dřeva, teorii není možno aplikovat za všech podmínek z hlediska praktických aspektů.

- Matice napětí a deformace zde představují tenzory druhého stupně. Tenzory v tomto případě představují sílu a směr působení. Počítá se s devíti složkami napětí a devíti složkami deformace.
- Zmíněn je tenzor tuhosti a zapsán v maticovém tvaru, kde jsou koeficienty deformace (Požgaj 1997).
- Skládá se z 9 rovnic s 81 parametry přičemž všem složkám deformací náleží složka napětí.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (3)$$

Metrickou složku tenzoru napětí zobrazíme v pravouhlém systému os. Zákon pro všeobecnou lineární anizotropii homogenitu tělesa můžeme zapsat ve fyzikálním tvaru.

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad (4)$$

-

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Koeficient S_{ij} nebo také koeficient neformovatelnosti je konstantní těleso s přímočaře anizotropní inklinací. Pokud nejsou data konstantní, těleso je nerovnoměrně anizotropní. Determinant matice S_{ij} se rovná nule. Napětí je možné zapsat následující maticí:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Koeficient C_{ik} je tuhostní koeficient. Pružný potenciál má následující tvar:

$$V = \frac{1}{2}(\sigma_x * \varepsilon_x + \sigma_y * \varepsilon_y + \sigma_z * \varepsilon_z + \tau_{yz} * \gamma_{yz} + \tau_{xz} * \gamma_{xz} + \tau_{xy} * \gamma_{xy}) \quad (7)$$

Pro méně komplikovaný výraz:

$$\varepsilon = S \cdot \sigma \quad (8)$$

$$\sigma = C \cdot \varepsilon \quad (9)$$

Finální vzorec vypadá následovně (Požgaj, 1997):

$$C = S^{-1} ; S = C^{-1} \quad (10)$$

4.4. Fyzikální vlastnosti dřeva

Do souboru fyzikálních vlastností dřeva a materiálů na bázi dřeva se zařazují: povrchové a vzhledové vlastnosti, vlhkost a vlastnosti s ní spojené, hustota, tepelné vlastnosti, elektrické vlastnosti, akustické vlastnosti a šíření záření těmito materiály (Matovič, 1993). Fyzikální vlastnosti, které budou zmíněny v této práci jsou hustota a vlhkost, druhá z nich se bude, za účelem porovnání námi naměřených dat s literaturou, přepočítávat na 12 % vlhkost.

4.4.1. Hustota dřeva

Hustotu dřeva můžeme charakterizovat jako poměr mezi hmotností dřeva a objemem. Hmotnost dřeva však není fixní veličina, zejména díky obsahu vody ve dřevě. Díky tomuto jevu rozlišujeme hustotu v absolutně suchém stavu a hustotu vlhkého dřeva při vlhkosti 12 %. Hmotnost a objem nejsou veličiny přímo úměrné.

Objem roste jen do doby nasycení dřevních vláken, zatímco hmotnost může růst až do maximálního nasycení. Hustotu ovlivňuje množství a objem pórů ve dřevě. Další důležitou veličinou je hodnota dřevní substance. Ta představuje hmotnost dřeva bez submikroskopických dutin a liší se v závislosti na chemickém složení dřeva.

Průměrná hustota celulózy je 1555 kg/m^3 , hemicelulózy 1500 kg/m^3 a ligninu 1390 kg/m^3 . Jelikož podíl těchto látek je u našich dřevin přibližně stejný, uvádí se pro všechny dřeviny průměrná hodnota 1530 kg/m^3 (Požgaj a kol., 1997).

4.4.2. Vlhkost dřeva

Dřevo je hydrokopický materiál, který přijímá a odevzdává vodu v závislosti na prostředí jak v kapalném, tak i v plynném formě. Vlhkost má nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti dřeva, ale pro životní funkce stromu je tato vlastnost nezbytná. Z těchto důvodů není hygroskopicitu považována za vadu dřeva, ale spíše za jeho přirozenou součást. Ve dřevě nalezneme vodu ve třech základních formách. Voda chemicky vázaná je součástí chemických sloučenin dřeva. Nelze ji ze dřeva odstranit běžným sušením, a pro získání jejích hodnot musíme spálit dřevní hmotu, její hmotnost představuje 1-2 % sušiny dřeva. Z těchto důvodů je ve dřevě zastoupena i při nulové absolutní vlhkosti dřeva (Zejsa a kol., 2007).

Voda vázaná (hygroskopická) je voda uložená v buněčných stěnách, kde je chemicky upevněna pomocí vodíkových můstků na hydroxylové skupiny OH amorfni části celulózy a hemicelulóz. Voda vázaná se ve dřevě zastoupena v rozmezí (0-30 %) absolutní vlhkosti. Během charakteristiky fyzikálních a mechanických vlastností má největší a zásadní význam (Matovič, 1993).

Voda volná (kapilární) – je uložena v mezibuněčném prostoru v lumenech a ukládá se v případně nasycení buněčných stěn do maximální kapacity vody vázané. Pro fyzikální a mechanické vlastnosti představuje menší význam než voda vázaná (Požgaj a kol., 1997).

5. Vrstvené materiály

5.1. Historie lamelovaných materiálů

Slepená lamelovaná dřeva jsou stavebním materiálem 20. století. Jejich vynález se připisuje německému podnikateli jménem Otta Hetzer mezi lety 1902 a 1906. Tento stavební materiál prošel třemi základními etapami vývoje (Sandoz, 2009).

Poprvé se objevuje v architektuře díky příležitosti bruselské univerzity v roce 1958, kde se zvedl zájem veřejnosti o tento materiál. Po tomto momentu začíná materiál expandovat do okolních zemí jako je Rakousko, Německo, a Švýcarsko (Devos a Floré 2009, Sandoz, 2009).

Zadruhé, rozvoj v oblasti chemie, po druhé světové válce byla přírodní lepidla (kasein z mléka, rybí pojivo, výtažek ze zvířecích kostí) nahrazena syntetickými smolami (formaldehydy) (Keimel, 2003).

Třetí etapa stále trvá a vznikla po konci socialismu v 1989, kdy dřevařské podniky s nárůstem konkurence ze zahraničí musely hledat cesty, jak zlepšit kvalitu svých produktů. Prakticky došlo k zakomponování produkčních faktorů do etap designu s více předvýrobními systémy. Příkladem můžou být „stress skin panels“ spojované se jménem Metz nebo předvýrobní slepené spojení od Ferwooda. Příprava částí řeziva je dělána automaticky v počítačovém programu. Částečné strukturální systémy jsou nastaveny v během výroby, aby se předešlo ztrátám času na stavbě a časovým prodlevám. Tato strategie umocňuje konkurenceschopnost, a proto dává šanci inovativním továrnám na rozsáhlejší geografické aplikace (Blass a Fermosser, 2004; Sandoz, 2009).

5.2. Vrstvení lamel

Lamelování je tvorba nových materiálů prostřednictvím vrstvení lamel na sebe, s ohledem na orientaci vláken, které při tomto přístupu mají shodnou orientaci. Tento způsob je hojně využíván ve stavebně-truhlářském odvětví. Lamelováním je možné vytvořit atypické stavební prvky, které jsou jinými metodami těžko dosažitelné. Při tvorbě lamelových konstrukcí platí, že při tvorbě menších poloměrů by se měly využívat menší tloušťky lamely (Král a Hrázský, 2005^B).

Z výzkumu Giurgiu a Cismaru (2011) vyplývá, že při zvýšení počtu lamel je větší odolnost v ohybu dřevěného vzorku, a to i u méně kvalitních dřevin. Výzkum byl prováděn na topolu osika (*Populus tremula L.*) a vzorky byly vyrobeny z 2, 3, 4 a 5 lamel, přičemž byly zachovány stejné rozměry příčného průřezu vzorku (šířka 50 mm, výška 100 mm). Se zvyšujícím se počtem lamel rostla i síla potřebná k jejich ohnutí s ohledem na počet lamel se snižoval průhyb testovaného vzorku snižoval průhyb testovaného vzorku.

Autoři vysvětlují tento jev nárůstem vrstev lepidla ve vzorcích. S tím související modul pružnosti vzrůstal o 10 % při třech lamelách oproti vzorku tvořeným jen dvěma lamelami, při čtyřech lamelách o 18 % a při pěti lamelách o 29 % (Giurgiu; Cismaru, 2011).

5.3.Vlastnosti vrstvených materiálů

Z předchozí kapitoly *Tvorba lamel* vyplývá, že velikost kontaktní plochy má za následek lepší mechanické i fyzikální vlastnosti vrstvených materiálů. Při výrobě lamel a překližek je také možné odstranit či omezit některé nevhodné vlastnosti dřeva, této možnosti se při výrobě vrstvených materiálů hojně využívá. Materiály touto cestou vyrobené mají větší homogenitu než rostlé dřevo a je zde eliminován problém s rozdílnými vlastnostmi, v různých směrech. Při lamelování je zachována stejná orientace vláken jako u rostlého dřeva a je jen v jednom směru. Díky této charakteristice dosahují lamely výborných vlastností ve směru vláken. Navzdory lepení jsou i u lamel vlastnosti kolmo na vlákna nižší, proto se bere při užití vrstvených materiálů v úvahu hlavně působení vláken podél. Z tohoto důvodu je užití zmíněných materiálů přizpůsobeno jejich specifickým vlastnostem. Lamelové dílce jsou používány v truhlářské výrobě například na výrobu nosných konstrukcí sedacího nábytku nebo lamel do postelí. U těchto konstrukcí se využívá i relativně dobré odolnosti proti cyklickému namáhání (Gaff a Gáborík, 2014). Deskové materiály je možné vyrábět lamelováním, nicméně pro tento účel je vhodnější využití metody překližování. Důvodem je kolmá orientace vrstev, která zajišťuje stejné vlastnosti při namáhání ve dvou směrech. Materiály nalézají své využití i ve stavebním

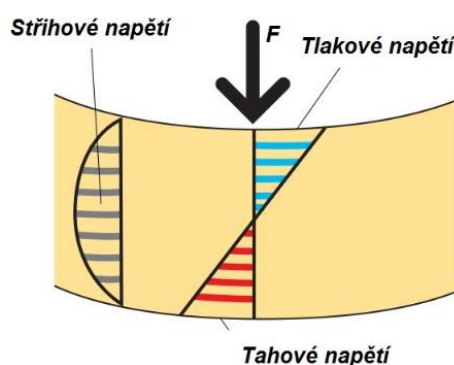
průmyslu, kde se uplatňují jak ke konstrukčním, tak k nekonstrukčním účelům (Bukovský, 1993).

U překližovaných materiálů je pevnost v ohybu podél vláken vnější vrstvy asi o 20 % větší než ve směru kolmo na vlákna. Zmenšením odklonu vláken sousedních vrstev na 45° nebo na 30° je možné dosáhnout podobné pevnosti ve více směrech. Při použití více vrstev v menších úhlech je materiál více homogenní (Král a Hrázský, 2005^A). I přes hojné užívání se hledají cesty jak tento materiál a jeho mechanické vlastnosti zlepšit.

6. Vyztužování vrstvených materiálů

Během tvorby nových materiálů se velká část inovací zaměřuje na vyztužování dřeva nebo materiálů na jeho bázi. Máme šanci porovnat vyztužování materiály, které sami o sobě tvoří nosné prvky, například ocelové profily nebo lisované drátované sítě do deskových materiálů. Tyto materiály vykazovaly větší pevnost, s pevností se zvyšovala i hmotnost materiálu a případná možnost koroze při nedostatečné konstrukční ochraně tohoto nosného prvku. Další velkou nevýhodou kovových částí je jejich chování během požárů. Na rozdíl od dřeva, kov má nižší mez kluzu (Šilhan, 2008).

Během zatížení tělesa působí na materiál tlak (Obr. č. 7), ten se projevuje odlišně v různých částech namáhaného materiálu. V horní části materiálu se dává najevo tlakem a ve spodní části tahem. Klidová část (nedeformovatelná) se při zatížení nazývá neutrální osa. Část mezi tlakovým a tahovým napětím se nazývá smykové napětí.



Obrázek č. 7 Vztah tahového a tlakového napětí (Inspirováno: www.swedishwood.com)

Tlaková pevnost podél vláken je zhruba o 30 % vyšší než tahová, z toho vyplývá, že před porušením vzorku můžeme pozorovat první známky porušení v tahové zóně během ohybu tělesa. Následné zlomení tělesa se dále projevuje odklonem vláken, a po překročení meze pevnosti dochází k úplnému zlomení tělesa (Požgaj a kol., 1997). Pro zamezení odklonu vláken se aplikují materiály, které mají zabránit porušení materiálu v tahové zóně. Pro tento záměr se v současné době využívají vysokopevnostní vlákna, která jsou umístěna v zóně nejvyššího tahového namáhání v takovém případě neslouží primárně pro přenos tahového napětí, ale fungují jako zpevňující složka celého systému (Yao a kol., 2012).

6.1. Typy vláken

Za účelem zvýšené pevnosti výrobku se v dnešní době používají především vlákna uhlíková, skelná a aramidová. Přičemž každý typ vláken má rozdílné vlastnosti při mechanickém namáhání a odlišné nároky na použití (Sviták a kol., 2013). Využití těchto vláken se provádí v různých formách aplikace. Mezi nejrozšířenější patří aplikace s polymerovým lepidlem, které se označuje jako FRP (Fiber Reinforced Plastic). Takto připravené lamely se mohou využívat při tvorbě nových nosných dřevěných dílců tak, že se zalisují přímo do materiálu. Při opravě již existujících nosníků se externě zpevní nosník těmito vlákny, za předpokladu, že není možná jeho výměna (Šilhan, 2008).

Díky vlastnostem jako jsou nízká váha a dobrá pevnost v tahu jsou hojně využívané vysokopevnostní materiály na výztuhu dřevních konstrukcí. Například uhlíková tkanina, která se u spotřebitelů těší velké oblibě, má hmotnost na jeden metr čtvereční 160–200 g. Zásadní veličina nejen pro náš výzkum je pevnost v tahu, která zvyšuje pevnost materiálu při kombinaci se dřevem, kde se tkanina umísťuje do tahové zóny. Mezi nejpoužívanější vlákna patří aramidová, právě vlákna uhlíková (kevlar) nebo skleněná (Šilhan, 2008).

Aramidová vlákna jsou propylenová umělá vysokopevnostní vlákna, u kterých je pevnost v tahu 2 GPa a modul pružnosti 100 GPa (Šilhan, 2008). Jejich účinnost je ovšem podmíněna sníženou vlhkostí. Z těchto důvodů jsou nevhodná k použití na dřevní hmotu (Wei a kol., 2013).

Uhlíková vlákna patří mezi nejpevnější vlákna na trhu pro vyztužování kompozitu. Vyrábějí se pyrolýzou organických materiálů, během které vznikají dlouhé anorganické uhlíkové řetězce. Objem uhlíku závisí od použité teploty při pyrolýze. Čistě z pevnostního hlediska jsou uhlíková vlákna, vzhledem k jejich tloušťce, nejpevnějším materiálem. Jsou tvořena uhlíkovými krystaly, které jsou ve vlákně orientované paralelně k ose vlákna. Pevnost v tahu dosahuje 4 GPa a modul pružnosti až 600 GPa (Šilhan, 2008). Podle způsobu výroby lze uhlíková vlákna rozdělit na:

1. Grafitová, vznikající při teplotě 2 800 – 3 000 °C, obsahující až 98 % uhlíku
2. Karbonizovaná, vznikající při teplotě 400 °C, obsahující cca 90 % uhlíku

3. Částečně karbonizovaná, vznikající při teplotě 900 – 1 000 °C, obsahující 90 - 95 % uhlíku (Sviták a kol., 2013).

Skleněná vlákna jsou materiál získaný z taveniny nízkoalkalického skla. Pevnost v tahu těchto vláken je kolem 1 GPa a modul pružnosti 600 GPa. Při krátkodobém zatížení zvyšují především pevnost, při dlouhodobé zátěži jsou naopak vhodnější uhlíková vlákna, a to z toho důvodu, že sklená vlákna mají v poměru k materiálu zvýšenou reologii, což představuje tečení materiálu.

Sklená vlákna vykazují reologické změny při dlouhodobé zátěži, na rozdíl od aramidových vláken, která jsou náchylná ke změně vlhkosti. V návaznosti na tyto skutečnosti se při aplikaci na dřevěné nosné prvky jeví vlákna uhlíková jako nejvhodnější (Šilhan, 2008).

6.1.1. Forma použití vláken

Pro zefektivnění aplikace jsou používány především tkaniny tvořené jednotlivými vlákny. Vysokopevnostní vlákna jsou ucelena ve svazcích a mohou se vyskytovat v rozličných formách jako je rohož, roving nebo tkanina.

Rohože jsou vyrobené z dělených vláken o délce cca 25-50 mm nebo z kontinuálních vláken, která jsou do sebe zapletená. Tato vlákna jsou spojována prostřednictvím polymerových pojiv tak, aby po zalisování rohože byl zajištěn pevný tvar a jednotlivá vlákna byla fixována do svazků a zamezilo se jejich vypadávání. Obsah pojiva se pohybuje v rozmezí 5-30 %. Při kontinuální výrobě je obsah pojiv nižší než při tvorbě rohoží z nasekaných vláken. Nasekaná vlákna jsou neuspořádaná a výsledný produkt má nižší pevnost i tuhost, ale výsledné vlastnosti jsou v rovině izotropní (Kořínek, 2015).

Roving je parametr, který informuje o počtu sdružených vláken a jejich zákrutů. Jednotlivé prameny mají nulový nebo malý počet zákrutů, (méně než 40 zákrutů/m) a slouží k výrobě profilů tažením nebo navíjením. Dodávány jsou nejčastěji v cívkách. Jako veličina jemnosti se udává 45 tex (hmotnost vlákna v gramech/1000 m). Rovingy se označují také číslem, které určuje počet vláken v prameni. Při praktickém označení 1 k nese kód informaci, že pramen je složen z 1000 vláken (Kořínek, 2015).

Tkaním vyrobené plošné výrobky jsou z pramenů uložených kolmo na sebe v útku a osnově. Zvýšením nebo snížením počtu pramenů v osnově vznikají různé vazby. Základní vazby jsou plátno, kepr a atlas. Tímto způsobem zpracování je možné ovlivnit výsledné vlastnosti tkaniny. Čím více pramenů je uloženo ve směru osnovy (podélný směr), tím vyšší pevnost a tuhost bude mít v daném směru výsledný kompozit. Lze tedy vyrobit i tkaninu, která bude mít kolmo na vlákna stejné mechanické vlastnosti (Kořínek, 2015).

Příznivý faktor pro využití těchto tkanin jsou shodné vlastnosti ve dvou navzájem kolmých směrech. Nevýhodou může být, že vlivem struktury není materiál zcela rovný, ale vlnitý. Tento způsob zpracování však pro vyztužování materiálů nepředstavuje žádný problém. Díky vývoji nových postupů při zpracování dochází ke zlevňování výroby, a tím se rozšiřuje jejich využití (Wei a kol., 2013).

6.1.2. Vyztužení LVL uhlíkovými vlákny

Tloušťka a počet vrstev jsou důležitými faktory pro mechanické vlastnosti lamel jak již informuje kapitola 4. Dalšími faktory, které významně ovlivňují mechanické vlastnosti jsou výběr lepidla, druh dřeviny a kvalita řeziva, ze kterého je lamela zhotovená. V neposlední řadě nelze opomenout určující položku použitého nedřevního komponentu, tedy buku (Bukovský, 1993).

6.1.3. Další vrstvené materiály

Dřevo je možné vrstvit mnoha způsoby. Mezi základní typy rozdělení vrstvení dřeva se řadí jeho uložení. V běžné praxi jsou kompozity nejčastěji využívány jako nosné prostředky nebo krycí vrstvy. Pro jádra výrobků je nejčastěji vyhledáváno dřevo nižší užitné hodnoty, k těmto účelům slouží zejména lehké dřeviny. Dřevo pro krycí vrstvu musí navíc splňovat jak pevnostní, tak estetická kritéria.

6.2. Lepidla

Pojidla či lepidla (adheziva) se svými vlastnostmi řadí mezi nekovové materiály s vysokou vnitřní soudržností (kohezí). Lepení samotné je jev spojující dva prvky v tuhém skupenství látkou kapalnou schopné spojovat tuhá tělesa (adherend) následkem své přilnavosti (adheze). Plastický stav hmoty je schopen vytvořit tuhý spoj s dostatečnou pevností mezi lepenými elementy (materiály). Takový prostředek se nazývá lepidlo (Keimel, 2003).

Hlavní složkou lepidel jsou makromolekulární látky. Dělí se buď na látky rozpustné nebo takové ve formě disperze v koloidním roztoku. Zmíněný roztok tvoří rozpouštělo, nejčastěji voda, z vysublimovatelné kapaliny. Vlastnosti lepidel se dají korigovat následovně:

- 1) Plnidla – Označují lepící látky ve tvaru prášku.
- 2) Nastavovadla – Jsou prakticky lepící škroby používající se jako náhrada za dražší látky, které zvyšují viskozitu lepidla. Použitím spíše lepidlo nepronikne do dřeva, což by mohlo poškodit jeho spoj. Za nastavovalo se dá považovat i vzduch, který se přimíchá do směsi. Objem hmoty se může zvýšit až čtyřikrát.
- 3) Zušlechťující přísady – Přidávají se, pro zkvalitnění vlastností lepeného spoje. Látky odpuzující vodu (např. parafin nebo vosk) a další fungicidní přípravky (Sedliačik a Sedliačik, 1998; Zemiar a kol., 2009).

7. Metodika

Metodiku experimentální části lze rozdělit do třech základních kroků:

- Tvorba zkušebních těles
- Mechanické testování
- Výpočet sledovaných charakteristik

7.1. Tvorba zkušebních těles

Zkušební vzorky byly zhotoveny z dřeviny buku lesního (*Fagus silvatica* L.), a to z lamel ve dvou odlišných tloušťkách (5 mm a 9 mm) a čtyřech odlišných délkách. Přířezy byly naformátovány na dlouhé lamely. Z takto připravených lamel se stala zkušební tělesa pro experiment, která nevykazovala žádné zjevné mechanické nedostatky. Zkušebních těles bylo použito 30 kusů pro každý sledovaný rozměr. Toto číslo je vyšší než je potřebný počet pro testování z důvodu eliminace případné chyby.

7.1.1. Třídění a značení vzorků

Před krácením se nejdříve provedlo rozvržení umístění jednotlivých zkušebních vzorků dle rozměrů na připravenou lamelu. Podmínka byla, že vzdálenost mezi dvěma vzorky musí být více než 5 mm a všechny tři vzorky musí být umístěny na jedné lamele. V praxi to znamená, že na jedné dlouhé lamele byly tyto tři vzorky: 17- BK-LA-D-PVAC-9 a lamely 17'- BK-LA-D-PVAC-9 a 17''- BK-LA-D-PVAC-9.

Jako příklad je možno uvést 7- BK-LA-D-PVAC-9, jedná se o vzorek z bukového dřeva, který byl slepen PVAC lepidlem z lamely 7- BK-LA-D-PVAC-9 o tloušťce 9 mm.



Obrázek č. 8 Kódování vzorků

Lamely 7'- BK-LA-D-PVAC-9, a 7'''- BK-LA-D-PVAC-9 byly slepeny a na stranu 7'' byly podlepeny sklolaminátovými vlákny. V případě druhého typu vzorků byly vzorky jen polepeny sklolaminátovým vláknem. Vzorek je tvořen jen jednou vrstvou dřeva. Po důkladném naměření a popsání lamel byly vzorky kráceny na požadovaný rozměr na zkracovací pile.

7.1.2. Lepení zkušebních vzorků

Dva typy vzorků se skládaly ze dvou slepených vrstev tvořících vzájemně jeden zkušební vzorek. Pro vytvoření tohoto spoje bylo použito PVAC lepidlo. Při jeho aplikaci se postupovalo dle pokynů technického listu zhotoveného výrobcem (viz. Příloha č. 5). PVAC lepidlo AG-COLL 8761/L D3 je jednosložkové, disperzní, polymerní lepidlo určené především pro interiérové použití. Stejné lepidlo bylo také použito k vytvoření spoje mezi vzorkem a sklolaminátovými vlákny.

Postup lepení byl následující: Lepidlo se aplikovalo na vzorek po celé délce prostřednictvím štětců, aby se na obou vzájemně lepených plochách vytvořil film z lepidla. Následně se spojené vzorky připevnilly mezi stůl a truhlářské svorky k docílení dostatečného tlaku pro odpovídající adhezi lepidla.



Obrázek č. 9 Lepení vzorků

Po vytvrdnutí lepidla a zaznamenání dat (rozměry a hmotnost) se proces lepení opakoval. Tentokrát se na všechny zkušební tělesa lepila skelná tkanina, která se nejdříve nakrátila na velikost jednotlivých vzorků a posléze nalepila. Pro lepší rozložení tlaku se použil přítlak prostřednictvím dřevotřískové desky.



Obrázek č. 10 Lepení skelné tkaniny



Obrázek č. 11 Použitá skelná tkanina (Zdroj: www.kittfort.cz/produkty/polyesterove-a-epoxidove-pryskyrice/skelna-tkanina-355/)

Slepené vzorky se po procesu adheze nechaly klimatizovat při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu 60 %. Jedná se o proces mezi operacemi lepení. Tento postup se opakoval dvakrát, jednou po slepení lamel, podruhé po aplikaci skelné tkaniny.

Tabulka č. 1 Přehled průměrných hodnot připravených vzorků

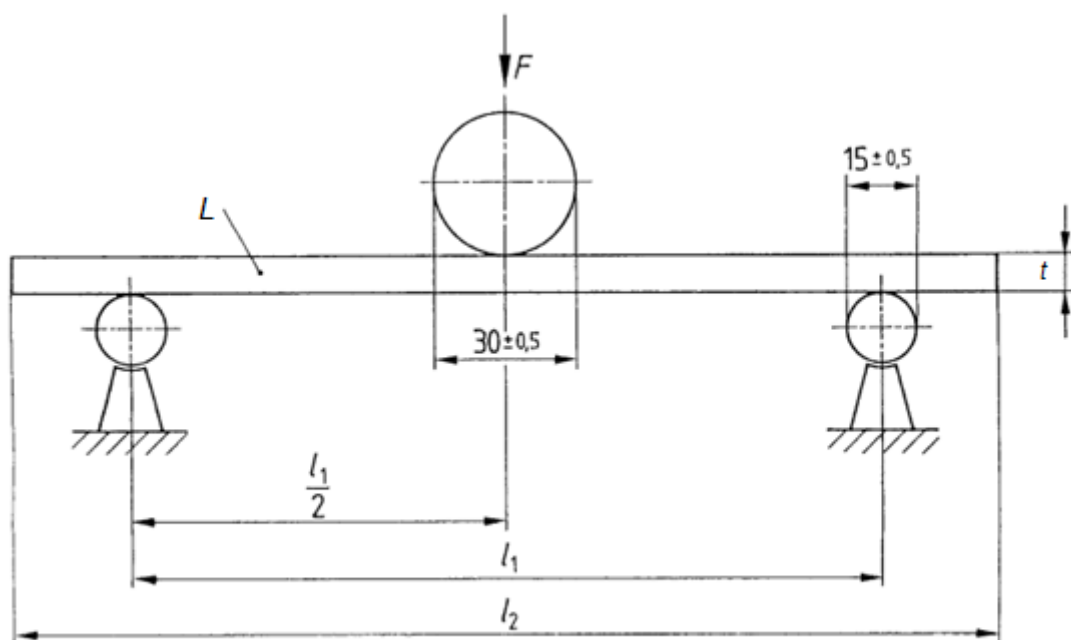
Typ souboru	Vzorky před vysušením (g)	Vzorky po vysušením (g)	Délka (mm)	Šířka (mm)	Výška (mm)	Vlhkost (%)
BK-LA-D-PVAC - 5	19.2	17.92	140.12	34.96	5.15	7.1
BK-LA-D-PVAC - 9	51.48	47.65	221.55	35.45	8.96	8.0
BK-LA-D-PVAC 5 - LEPENÉ	59.68	58.52	242	35.79	10.23	7.3
BK-LA-D-PVAC 9 - LEPENÉ	177.63	170.93	405.1	36.24	17.67	7.7

7.2.Mechanické testování

Při procesu měření byl použit univerzální zkušební stroj TIRA test 2850 S, který se využívá k univerzálním zkouškám těles. Je charakterizován velkým množstvím upínacích čelistí pro rozdílné způsoby deformace. Pro měření se použil tříbodový statický ohyb na měření požadovaných charakteristik.



Obrázek č. 12 Měřicí stroj TIRA test 2850 S



Obrázek č. 13 Uspořádání ohýbacího zařízení (Zdroj: EN 310)

Nastavení zkušebního stroje TIRA kde:

L – zkušební vzorek

F – je zatížení

t – tloušťka zkušebního vzorku

$l_1 - 20 * t$

$l_2 - l_1 + 40$

Vzdálenosti spodních podpěr se upravily podle tloušťky testovaného materiálu tak, aby vzdálenost l_1 byla dvacetinásobek tloušťky testovaného tělesa. Dbalo se na to, aby každý soubor měl přizpůsobenou vzdálenost podpěr. Celé toto měření bylo prováděno ve shodě s normou ČSN EN 310. Pro přesné měření musel být nastaven průtahoměr zaznamenávající průhyb vzorku. Tato data byla následně zapisována do grafů, která byla párována s průhybem a s vynaloženou silou.



Obrázek č. 14 Vkládání vzorku na podpěry

Tlak na vzorek vyvíjela mechanika měřicího zařízení konstantní rychlostí 3 mm/min tak, aby se doba trvání zkoušky nepřesáhla 2 min. Působení bylo zastaveno po přerušení soudržnosti tělesa, prakticky v okamžiku, kdy byl měřený pokles napětí 10 %. Celé měření bylo zaznamenáno v počítačovém programu TIRA test, z něhož pak získáváme napětovo-deformační diagram. Při této práci vycházíme z norem ČSN 490115 pro zjišťování modulu pružnosti dřeva kolmo na vlákna a ČSN 490147 pro zjištění statického modulu pružnosti. Výstupem zkoušky byl silově-průhybový diagram.

Při stanovení vlhkosti byla uvedena do praxe norma ČSN 49103. Pro získání hodnot vzorků v absolutně suchém stavu se použila sušící komora Binder ED 23 (viz obr. 10) s přirozenou cirkulací vzduchu. V této komoře se vzorky sušily při teplotě 103 °C až do absolutního vysušení. Vzorky zde byly vysušeny na nulovou vlhkost, aby získaly hodnoty, při jaké zkouška vlhkosti proběhla. Pro kontrolu změny vlhkosti se vybral jeden náhodný vzorek z každé skupiny, jehož váha byla měřena vždy zhruba po 24 hodinách. Zkouška jsem ukončila ve chvíli, kdy dvě po sobě jdoucí měření měla rozdíl v hmotnostech vzorku menší než 0,03g. Po zkoušce se z naměřených hodnot vypočítaly průměrné hodnoty vlhkosti.



Obrázek č. 15 Sušárna Binder ED 23

7.3. Výpočet sledovaných charakteristik

Výpočet chord modulu CH_m :

$$CH_M = \frac{F_P - F_E}{Y_P - Y_E} * \frac{l_0^3}{4 * b * h^3} \text{ (MPa)} \quad (11)$$

Výpočet tangent moduly:

Mez pevnosti E_e :

$$E_E = \frac{F_E}{Y_E} * \frac{l_0^3}{48 * I} \text{ (MPa)} \quad (12)$$

Střední hodnota E_{mv} :

$$E_{MV} = \frac{F_E}{Y_{MV}} * \frac{l_0^3}{48 * I} \text{ (MPa)} \quad (13)$$

Mez úměrnosti E_p

$$E_P = \frac{F_P}{Y_P} * \frac{l_0^3}{48 * I} \text{ (MPa)} \quad (14)$$

Kdy je moment setrvačnosti popsán takto:

$$I = \frac{b * h^3}{12} \text{ (MPa)} \quad (15)$$

Kde:

l – vzdálenost podpěr (mm)

h – výška tělesa (mm)

b – šířka vzorku (mm)

F_p – je síla v meze pružnosti (N)

F_E – je síla u limit proporcionality (N)

Y_p – je průhyb při meze pružnosti (mm)

Y_E – je mez proporcionality (mm)

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \quad (16)$$

Kde:

W – relativní vlhkost tělesa před vysušením (%)

m_1 – hmotnost zkušebního tělesa před vysušením (g)

m_2 – hmotnost zkušebního tělesa po vysušení v (g)

Výpočet hustoty:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (17)$$

Kde:

ρ – hustota (kg/m³)

m – hmotnost (kg)

V – objem (m³)

Pro přepočet na 12 % vlhkost:

$$\sigma_{m12} = \sigma_m(1 + \alpha(w - 12)) \text{ (MPa)} \quad (18)$$

Kde:

α – opravný koeficient = 0,04

w – vlhkost tělesa v době zkoušení (%)

7.4. Zpracování naměřených dat

Data byla vyhodnocena v programu Matiss. Pro potřeby statistického zkoumání a vzájemného porovnání byla použita faktorová analýza rozptylu v softwaru Statistica 13. Tato analýza rozptylu hodnotí účinky vybraného faktoru na sledované charakteristiky.

Pro důkladnou analýzu byla data podrobena Duncanvu vícenásobnému testu, který byl prováděn s hladinou významnosti na $\alpha = 0,05$. F-test na základě hladiny významnosti P stanoví, zda, a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný. Podle hodnoty P lze testovaný faktor ohodnotit takto:

- $P < 0,05$ 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
- $0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný (viz. příloha č. 1 Duncanovy testy) (Gaff a Gáborík, 2014).

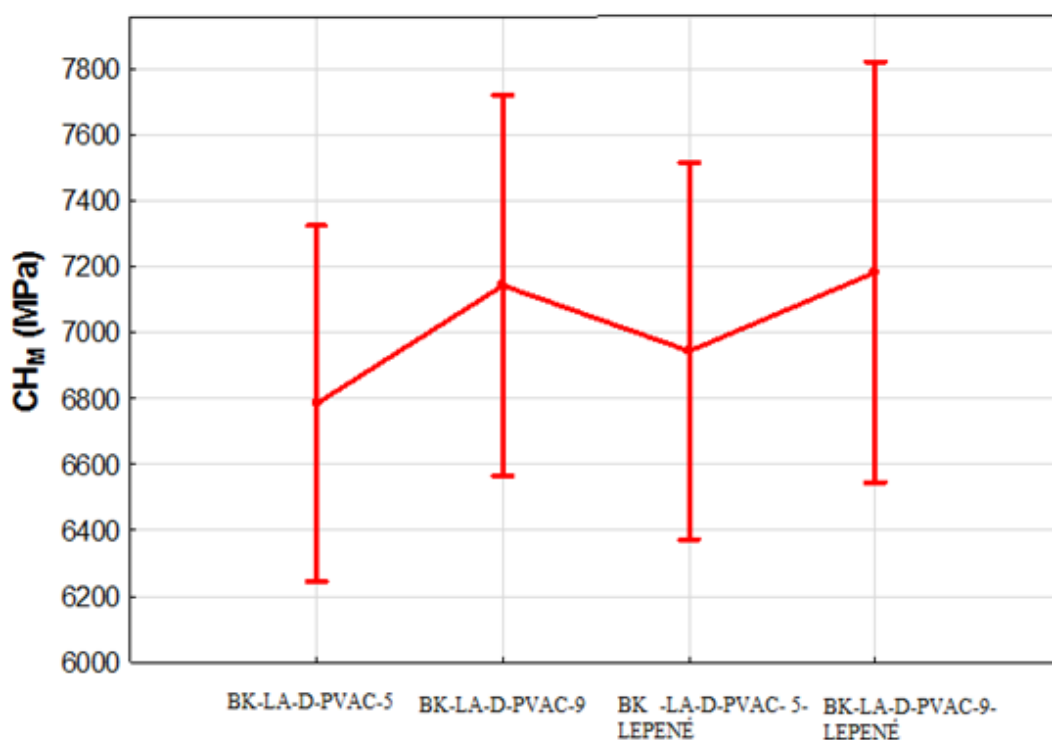
8. Výsledky a diskuse

Pro zpřehlednění názorné demonstrace výsledků byla vytvořena tabulka průměrných hodnot a sledovaných charakteristik. Z tabulky vyplývá, že i přes stejný proces výroby hustota vzorků nebyla stejná, lišila se o 12,98 %. Tento fakt vstupuje do výsledků a do velké části ovlivňuje vlastnosti sledované skupiny. Nejnižší hodnoty vykazovala skupina lamelovaná s tloušťkou 10,23 mm. Naopak největší hustotu měla skupina s průměrnou tloušťkou 5,15 mm. Vlhkost lamelovaného dřeva po čas zkoušky se pohybovala v rozmezí od 7,1 % do 8 %.

Tabulka č. 2 Průměrné naměřené hodnoty

Měřené charakteristiky	BK-LA-D-PVAC - 5	BK-LA-D-PVAC - 9	BK-LA-D-PVAC 5 - LEPENÉ	BK-LA-D-PVAC-9 LEPENÉ
Hustota (kg/m ³)	761.1	731.5	673.6	684.7
Vlhkost (%)	7.1	8	7.3	7.7
Chord modul (MPa)	6784.2	7142.5	6943.6	7182.7
Mez pevnosti (MPa)	11477	11611	12802	12610
Střední hodnota (MPa)	6627.8	7003	6706.2	6964.3
Mez úměrnosti (MPa)	8177	8187.1	8638.4	8846

8.1.Chord modul

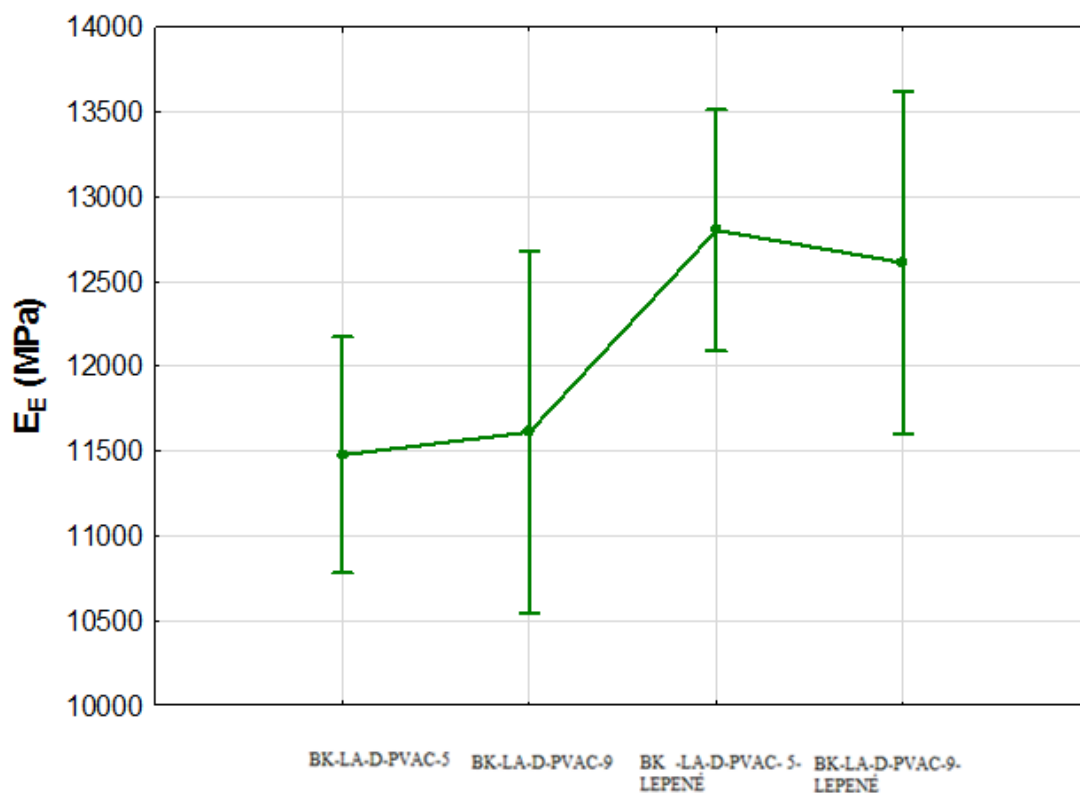


Obrázek č. 15. Graf chord modulu

Mezi sledovanými soubory nejsou patrné významné rozdíly. Slabý vývoj tendence je i přesto z grafu zjevný. Při porovnání průměrných hodnot můžeme z tabulky vyčíst, že u lepených vzorků byl nárůst tlaku vyšší. Pro vzorky o tloušťce 5 mm průměrný nárůst představuje 2,35 % oproti vzorcům lepeným. U vzorků o tloušťce 9 mm je výsledek ještě méně výrazný 0,56 %. Vliv tloušťky je ve výsledcích upraven přenastavením vzdálenosti podpěr při měření trojbodového ohybu.

Při porovnání lepených vzorků je zjevné, že vzorky dlouhé 5 mm mají nižší mez plasticity. Z toho lze usuzovat, že i po odhlédnutí od faktoru tloušťky je její vliv stále patrný. Z dat vyplývá, že při kombinaci lamelového dřeva a nedřevěného komponentu není nárůst meze plasticity významně vyšší než u dřeva obyčejného.

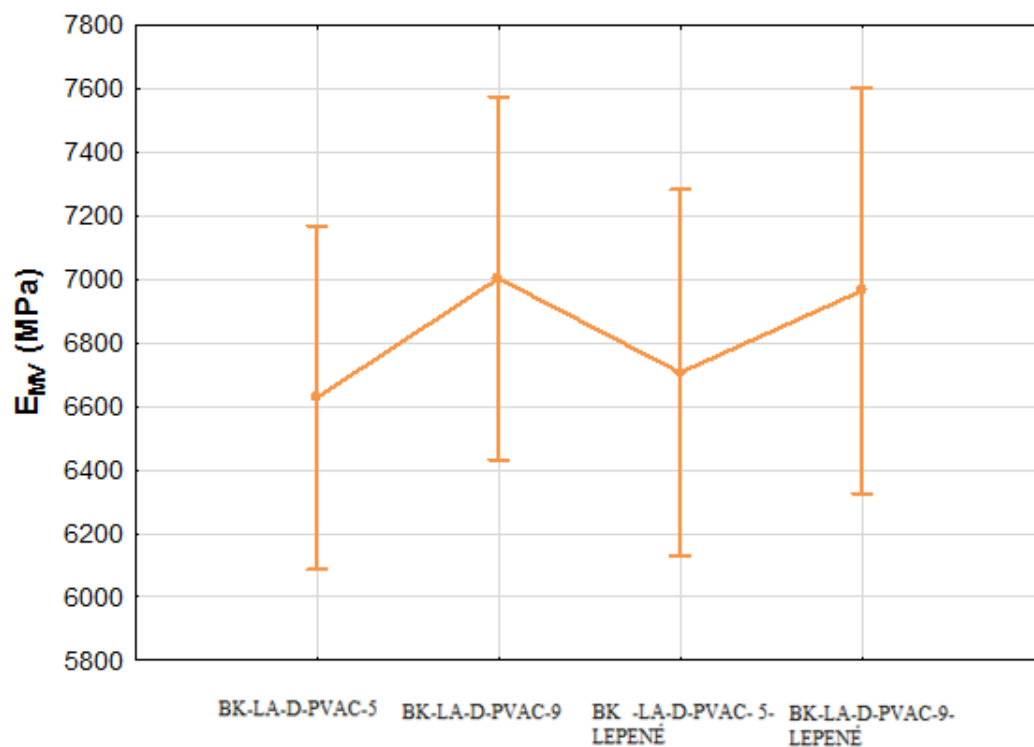
8.2. Mez pevnosti



Obrázek č. 16 Mez pevnosti

Mez pevnosti je sledovaná charakteristika, u které se asi nejvíce projevil význam lamelování. Vzorky o tloušťce 5 mm měly vzájemně mezi sebou rozdíl v pevnosti 11,54 %. S nárůstem tloušťky se zmenšuje rozdíl mezi lamelovanými a nelamelovanými vzorky, a to jen na 8,6 % u vzorků 9 mm, stejně tak jako u chord modulu. Je zde také patrné, že kratší vzorky dosahovaly menšího rozptylu dat. Jako průměrně nejpevnější se ukázala skupina o síle 10,23 mm ze skupiny 5mm.

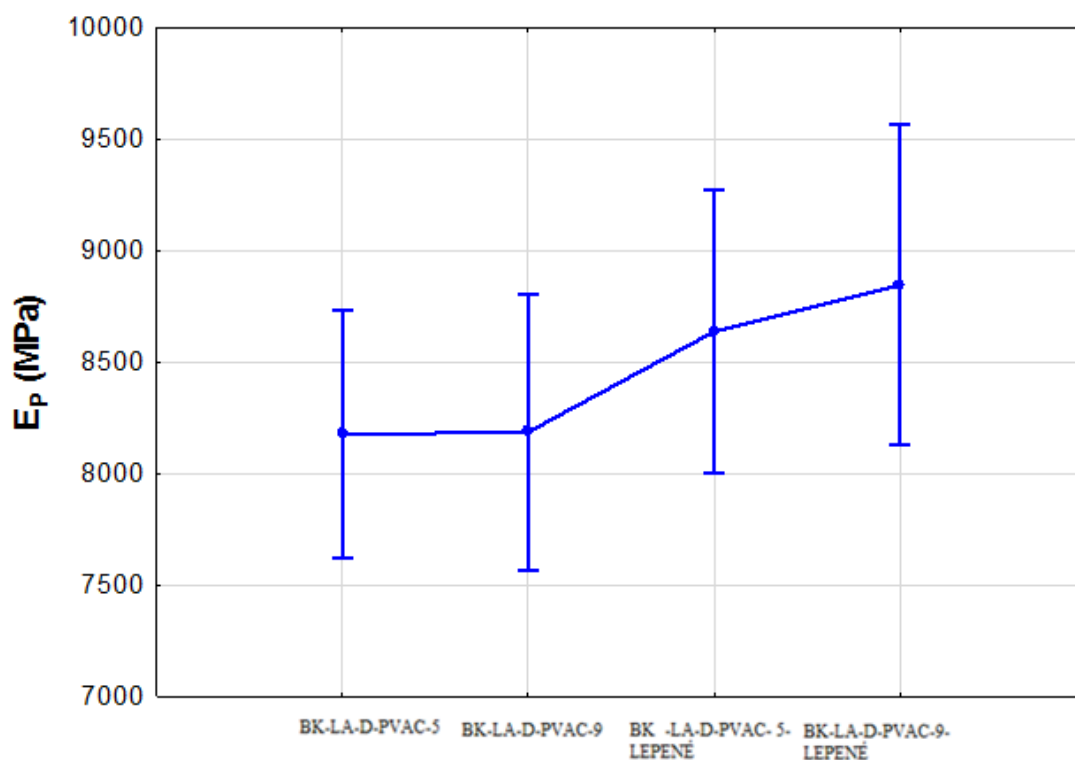
8.3. Střední hodnota



Obrázek č. 17 Střední hodnota

Střední hodnota je veličina, která nevykazuje žádné výrazné změny napříč všemi sledovanými skupinami. U vzorků 5 mm byl nárůst průměrných hodnot o 1,18 % a u skupin 9 mm byl zjištěn pokles střední hodnoty o 0,56 %.

8.4. Mez úměrnosti



Obrázek č. 1817 Mez úměrnosti

Na tomto grafu je nejlépe vidět nárůst tlaku při zvětšující se tloušťce vzorků. Vývoj průměrných hodnot není čistě lineární, je patrný odstup hodnot, který podmíněně závisí na využití nedřevního komponentu. U nelamelovaných skupin byl rozdíl mezi vzorky ještě méně nevýrazný, a to mezi průměrnými hodnotami byl jen 10 MPa .

9. Diskuse

Z výzkumu Svobody a kol. (2019) tedy patrně, že volba dřeviny, respektive její hustota je důležitým faktorem pro většinu sledovaných charakteristik.

Naměřené hodnoty indikují, že vliv lamelování nebyl tak znatelný, jak bylo zprvu očekáváno. Giurgiu a Cismaru (2011) píše, že s lamelováním roste pevnost a Král a Hrázský (2005^A) uvádí jako neoptimálnější tloušťku z hlediska pevnosti a elasticity 0,35 – 0,6 mm, nicméně tato tvrzení se v mém výzkumu neprokázala. Studie v závěru uvádí, že důvodem nárůstu pevnosti je lepená část, která zvyšuje mez pevnosti.

Oproti tomu výzkum Gaff a kol., (2014) informuje, že při srovnání výsledků jednotlivých laminovaných a nelaminovaných vzorků lze obecně konstatovat, že hodnoty síly meze pevnosti v ohybu lamelovaného dřeva jsou v průměru o 30 MPa nižší. Toto tvrzení nemohlo být naměřenými daty potvrzeno, naopak hodnoty meze pevnosti v ohybu ukazují, že obě testované tloušťky 5 mm a 9 mm vykazovaly nárůst pevnosti v ohybu při zatížení. Pro většinu sledovaných charakteristik vycházela metoda lamelování jako vhodná z důvodu nárůstu napětí. Nejvýrazněji se projeví zejména v mezi pevnosti.

Naměřené hodnoty mohly být ovlivněny okolním prostředím, jedním z faktorů, který mohl hrát roli a ovlivnit tak výsledná čísla je například teplota. Ayrilmis a kol. (2010) uvádějí, že hodnoty modulu pružnosti, stejně tak jako například namáhané síly, závisí právě na teplotě. Jako příklad uvádí situaci, kdy se při zvýšení teploty z -30° na 30° obě hodnoty modulu pružnosti snížily přibližně o 20 %. K takové změně teploty při mém experimentu sice nedošlo, avšak ke změně teploty došlo, je tedy pravděpodobné, že mohla ovlivnit výsledná čísla.

10. Závěr

Práce se zabývá použitím vysokopevnostních vláken spolu s lamelovaným dřevem a jeho mechanickými vlastnostmi, hlavně pak na modulem plasticity. Výsledky ukazují, že sledovaná vlastnost chord modul byla v obou případech tloušťky vzorků vyšší u lamelovaného dřeva. U lamelovaných vzorků o tloušťce 5 mm byl nárůst hodnot o 2,35 % vyšší než u vzorků nelamelovaných. Vzorky 9 mm široké vykazovaly rozdíl ještě méně výrazný, a to 0,56 %. Z výsledků je patrné, že chord modul se s narůstající tloušťkou zvětšuje. Porovná-li se lepený a nelepený dřevní materiál, lepený dosahuje vyšších hodnot stejné tloušťky.

Ačkoliv je nyní na trhu nepřeberné množství programů, které se zabývají modelováním na základě velmi přesných matematických a statistických metod, nevýhoda práce je v tom, že nabízí obecné porovnání dvou přístupů, nezkoumá však konkrétní software. Výhody tohoto výzkumu tkví v praktičnosti zadání úlohy, přístupu k technologiím a kvalitnímu softwaru. Školní prostředí a příležitost bakalářské práce umožňuje prakticky uchopit problematiku softwarových nástrojů při reálném zadání.

Význam oblasti dřevařství je zásadní pro využití vysokopevnostních materiálů, jelikož nabízí možnost snížení dřevní hmoty a využití méně kvalitních sortimentů dřeva při zachování či dokonce zvýšení jejich pevnosti. Tento výzkum může přispět k rozvoji truhlářského průmyslu, kde se vysokopevnostní vlákna využívají pro vysoce namáhané plochy. Ve stavebním průmyslu se tento jev už v praxi využívá, názorným příkladem mohou být opravy starších konstrukcí vazníků. Výsledky této práce se dají také využít při procesu analýzy a sběru dat pro nově vyvíjený program Matess, který se v současné době věnuje jen ohybovým křivkám, ale do budoucna se má měření rozšířit i o silově-průhybový diagram.

Budoucí výzkum by se měl zaměřit na jiné druhy dřeviny a jiné typy nedřevního komponentu. Jako zajímavá alternativa se jeví vlákna organická, které nejsou tak pevná jako vlákna umělá, ale s přihlédnutím na ekologickou podstatu materiálu by bylo vhodné srovnání technicky vyráběných vláken organického původu jako jsou vlákna lněná, kokosová nebo kopřivová. Z hlediska softwaru je důležité vyvíjet i analytické programy, které budou získaná data neustále zpřesňovat.

Seznam literatury a použitých zdrojů

ASHKENAZY, E. K., GANOV, E. *Anisotropy of Structural Materials* [in Russian], Handbook, Mashinostroyenie, Moscow, 1980. [70 s.].

AYRILMIS, N., BUYUKSARI, U., AS, N. Bending strength and modulus of elasticity of wood-based panels at cold and moderate temperatures. Cold Regions Science and Technology [online]. 2010, vol. 63 no. 1-2 [cit 2019-16-04]. Dostupné z WWW: <https://www.researchgate.net/publication/232383810_Bending_strength_and_modulus_of_elasticity_of_wood-based_panels_at_cold_and_moderate_temperatures>. ISSN 0165-232X.

BABIAK, M., DUBOVSKÝ, J. *Problémy mechanických vlastností dřeva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2001. 71 s. ISBN 80-228-1076-2.

BLASS, H. J., FELLMOSE, P. Design of Solid Wood Panels with Cross Layers, Proceedings of the WCT. CiteSeerX [online]. 2004, vol. 1, no. 1 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z WWW: <<http://holz.vaka.kit.edu/public/36.pdf>>.

BUKOVSKÝ, J. *Dějiny stavitelství: přehled vývoje architektury a stavebnictví*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1993. [239 s.] Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-900590-4-X.

BROŽ, P., PROCHÁZKA P. *Metoda okrajových prvků v inženýrské praxi*. Praha, 1987. 192 s.

BROŽOVSKÝ, J., MATERNA A. *Metoda konečných prvků ve stavební mechanice*. Matematika pro inženýry 21. století. Plzeň: ZČU v Plzni, 2012. 2-101 s.

DEVOS, R., FLORÉ, F. Modern wood. De Coene at Expo 58. ResearchGate [online]. 2009, vol. 24, no. 1 [cit. 2019-11-4]. Dostupné z WWW: <https://www.researchgate.net/publication/265284409_Modern_wood_De_Coene_at_Expo_58>. ISSN 9781 4724 34 60 9 24.

FUSEK, M., HALAMA, R. *Metoda konečných prvků a metoda hraničních prvků*. VŠB-TU Ostrava, 2011.

Dlupal Software s.r.o. RFEM - Profesionální program pro statické výpočty MKP. [online]. Praha: Dlupal Software s.r.o. 2019 [cit. 2019-11-04]. Dostupné z WWW: <<https://www.dlupal.com/cs/reseni/online-sluzby/oblasti-zatizeni-snehem-vetrem-a-zemetresenim>>.

GAFF, M., GAŠPARÍK, M., BARCÍK, Š. The Influence of Cyclic Loading on Ultimate Bending Strength of Beech Solid and Laminated Wood. *Drvna Industrija* [online]. 2014, vol. 65 no. 3 [cit 2019-24-02]. Dostupné z WWW: <https://www.researchgate.net/profile/Miroslav_Gasparik/publication/268120635Influence_of_cyclic_loading_on_the_shape_stability_of_solid_beech_wood_and_laminated_wood/links/5461d7e70cf27487b4530cbd/Influence-of-cyclic-loading-on-the-shape-stability-of-solid-beech-wood-and-laminated-wood.pdf>. ISSN 0537-0815.

GAFF, M., GAŠPARÍK, M., BAIK, M., VOKATÝ, V.^A Bendability characteristics of wood lamellae in plastic region. *Composite Structures* [online]. 2017, vol. 163 no. 1 [cit 2019-17-04]. Dostupné z WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316324710>>. ISSN 0263-8223.

GAFF, M., BABIAK, M., VOKATÝ, V., GAŠPARÍK, M., RUMAN, D. Bending characteristics of hardwood lamellae in the elastic region. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2017, vol. 116 no. 1 [cit 2019-18-04]. Dostupné z WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816315840>>. ISSN 1359-8368.

GAFF, M., GÁBORÍK, J. Effect of cyclic loading on the elasticity of beech solid and laminated wood. *BioResources* [online]. 2014, vol. 9, no. 3 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z WWW: <<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effect-of-cyclic-loading-on-the-elasticity-of-beech-solid-and-laminated-wood/>>. ISSN: 1930-2126.

GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita: Brno, 2009. ISBN 978-80-7375-312-2.

GIURGIU, M.; CISMARU, I.. Comparative study on the mechanical behavior of glued laminated beams made of spruce, pine and douglas fir wood. *Pro Ligno* [online]. 2011, vol. 7, no. 3 [cit. 2018-8-12]. Dostupné z WWW: <http://www.proligno.ro/en/articles/2011/3/giurgiu_full.pdf>. ISSN 1841-4737.

HU, W., GUAN, H-Y. Experimental and numerical study on optimization design of stretcher positions. *Wood Research* [online]. 2017, vol. 62, no. 4 [cit. 2019-08-04]. Dostupné z WWW: <https://www.researchgate.net/publication/320144617_Experimental_and_numerical_study_on_optimization_design_of_stretcher_positions>.

JUSHENG, Y., NAN, Y. A. brief review of FEM software technique. *Advances in Engineering Software* [online]. 1993, vol. 17, no. 3 [cit. 2019-08-02]. Dostupné z WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0965997893900799>>.

KAFKA, E. *Dřevařská přáručka*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00009-2.

KEIMEL, A. F. Historical Development of Adhesives and Adhesive Bonding. In: PIZZI, A.; Mittal K. L. (eds). *Handbook of adhesive technology*. Marcel Dekker: New York, 2003, s. 1–12. ISSN 9780203912225-1.

KEYLBERTH, R., KOLBMANN, F. Schutz und Trockung: Holz als Roh-und Werkstoff. *Springer-Verlag* [online]. 1954, vol. 12 no. 72 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z WWW: <https://link.springer.com/article/10.1007%2F978-3-642-06081-5_72>. ISSN 0018-3768.

KOLÁŘ, V. *Výpočet plošných a prostorových konstrukcí metodou konečných prvků*. 2. přepracované vydání. Praha: SNTL, 1972.

KOLLMAN, F. Creep of Small Wood Beams Under Constant Bending Load. *Riculture Room* [online]. 1959, vol. 1 no. 2150 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z WWW: <<https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/jm214s822>>.

KOŘÍNEK, Z. *Vlákna pro kompozity*. [online]. [2015]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z WWW: <<http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>>.

KRÁL, P., H RÁZSKÝ, J.^A. *Kompozitní materiály na bázi dřeva. Část 2, Dýhy a vrstvené materiály*. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2005. 206 s. ISBN 80-7157-878-9.

KRÁL, P., HRÁZSKÝ, J.^B. *Konstrukce a vlastnosti truhlářských překližovaných desek: slisovatelnost bukových překližek*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2005. ISBN 807157-857-6.

MATOVÍČ, A. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně, 1993. ISBN 80-7157086-9.

MELOUN, M., MILITKÝ, J. *STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT - v chemometrii, biometrii, ekonometrii a v dalších oborech přírodních, technických a společenských věd*. Praha: PULS, 1995. [600-840 s]. ISBN 80-85297-56-6.

PERELYGIN, L. *Náuka o dreve* 2. vyd. Bratislava:, 1965. 390-450 s.

POŽGAJ, A. a další. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vyd. Bratislava: PRÍRODA a. s., 1997. 296-370 s. ISBN 80-07-00960-4.

SANDOZ, J. L. Industrial ultrasonic grading formulti-glued laminated timber. *Études&constructionsbois*. Conceptbois technologie, 2009. 1-7 s.

SANDOZ, J. L., BENOIT, Y., DEMAY, L. Wood testing using acousto-ultrasonic. In: Proceedings of the 6th world conference on timber engineering. MKC Korea [online]. 2000. [vol. 01, no. 1] [cit. 2019-03-10]. Dostupné z WWW: <http://www.mkckorea.com/catalog/qseeman/UC-170/uc-170_ref1.pdf>.

SEDLIAČIK, M., SEDLIAČIK, J. Chemické látky v drevárskom priemysle. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolení, 1998. 285-6 s. ISBN 80-228-0745-1.

SIKORA, A., GAFF, M., HÝSEK, Š., BABIAK, M. New composite material based on winter rapeseed and his elasticity properties as a function of selected factors. *COMPOSITES PART B-ENGINEERING*, 2018, vol. 201, no. 15. Dostupné z WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822317342551>>. ISSN: 1359-8368.

SVITÁK, M., BARCÍK, Š., RYSPLER, J. *Application of carbon fibers on wood beams*. Acta facultatis xylologiae Zvolen. 2013. 5 - 13 s. ISSN 1336- 3824.

SVOBODA, T., SIKORA, A., ZÁBORSKÝ V., GAFFOVÁ, Z. Impact of Selected Factors on the Bending Forces at the Proportionality Limit and Yield Point in Laminated Veneer Lumber. *Bioresources* [online]. 2019, vol. 14, no. [cit. 2019-02-02]. Dostupné z WWW: <https://www.researchgate.net/publication/330966945_Impact_of_Selected_Factors_on_the_Bending_Forces_at_the_Proportionality_Limit_and_Yield_Point_in_Laminated_Veneer_Lumber>. ISSN 2491-2512.

ŠILHAN, O. Zesilování stavebních konstrukcí dodatečnou lepenou kompozitní výztuží. *Časopis Stavebnictví* [online]. 2008, vol. 06, no. 8 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z WWW: <http://www.casopisstavebnictvi.cz/zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi_A1126_I21>.

WEI, D. a kol. Influence of fuel moisture, charge size, feeding rate and air ventilation conditions on the emissions of PM, OC, EC, parent PAHs, and their

derivatives from residential wood combustion. *Journal of Environmental Sciences* [online]. 2013, vol. 25, no. 9 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074212602587#ceab10>>. ISSN: 1001-0742.

WITKOWSKI, T., LING, S., PRAETORIUS, S. VOIGTL, A. Software concepts and numerical algorithms for a scalable adaptive parallel finite element method. *Math Advances in Computational Mathematics* [online]. 2015, vol. 41 no. 6 [cit. 2019-16-03]. Dostupné z WWW: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10444-015-9405-4>> ISSN 1572-9044.

YAO, J., HU, Y., LU, W. A wood replacement material of sandwich structure using coir fiber mats and fiberglass fabrics as core layer. *BioResources* [online]. 2012, vol. 7, no. 1 [cit. 2019-02-02]. Dostupné z WWW: <http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_07_1_0663_Yao_HL_z_Wood_Replacement_Sandwich_Coir>.

YLINEN, A. Über die Beziehungen zwischen Spätholzanteil, Rohwichte, Jahrringbreite, Feuchtigkeitsgehalt und den Elastizitätsmoduln beim finnischen Kiefernholz: Holz als Roh-und Werkstoff. *Springer-Verlag* [online]. 1954, vol. 12, no. 7. [cit. 2019-02-02]. Dostupné z WWW: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF0260778>> ISSN1436-736.

ZEJDA, J., TIPPNER, J., SEBERA, V., KOŇASOVÁ, E., DÁNIEL, V. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2007. [56 s.]

ZEMIAR, J. a kolektiv. *Technológia výroby nábytku*. miesto neznáme : Technická univerzita vo Zvoleně, 2009. ISBN: 978-80-228-2064-6.

Použité normy

ČSN EN 310. Panely na bázi dřeva. Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu. Praha: Úřad pro normalizaci a měření 1993

ČSN 490101. Dřevo – všeobecné požadavky na fyzikální a mechanické zkoušky. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. 1979. 9 s.

ČSN 490103. Dřevo – zjišťování vlhkosti při fyzikálních a mechanických zkouškách. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. 1979. 6 s

ČSN 490115. Zjišťování meze pevnosti ve statickém ohybu. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. 1979. 5 s.

ČSN 490147. Metoda zjišťování modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu. Úřad pro normalizaci a měření. 1989. 7 s.

Seznam příloh

Příloha č. 1 Duncanův test pro naměřené hodnoty

Příloha č. 2 Konečné testy významnosti

Příloha č. 3 Technický list skelná tkanina

Příloha č. 4 Technický list uhlíkové tkaniny

Příloha č. 5 Technický list PVAC lepidla

Příloha č. 6 Software pracující s MKP

Příloha č. 1 Duncanův testy pro naměřené hodnoty

Tabulka č. 3 Duncanův test pro chord modul

		6784.2	7142.5	6943.6	7182.7
1	BK-LA-D-PVAC - 5	X	0.406930	0.693183	0.375175
2	BK-LA-D-PVAC - 9	0.406930	X	0.622711	0.920764
3	BK-LA-D-PVAC 5 - LEPENÉ	0.693183	0.622711	X	0.580557
4	BK-LA-D-PVAC-9 - LEPENÉ	0.375175	0.920764	0.580557	X

Tabulka č. 4 Duncanův test pro mez pevnosti

		11477	11611	12802	12610
1	BK-LA-D-PVAC - 5	X	0.827684	0.049924	0.083764
2	BK-LA-D-PVAC - 9	0.827684	X	0.069016	0.107143
3	BK-LA-D-PVAC 5 - LEPENÉ	0.049924	0.069016	X	0.755788
4	BK-LA-D-PVAC-9 - LEPENÉ	0.083764	0.107143	0.755788	X

Tabulka č. 5 Duncanův test pro střední hodnotu

		6627.8	7003	6706.2	6964.3
1	BK-LA-D-PVAC - 5	X	0.404123	0.846186	0.436327
2	BK-LA-D-PVAC - 9	0.404123	X	0.492571	0.923780
3	BK-LA-D-PVAC - 5 - LEPENÉ	0.846186	0.492571	X	0.523367
4	BK-LA-D-PVAC-9 - LEPENÉ	0.436327	0.923780	0.523367	X

Tabulka č. 6 Duncanův test pro pro mez úměrnosti

		8177	8187.1	8638.4	8846
1	BK-LA-D-PVAC - 5	X	0.981849	0.328040	0.170636
2	BK-LA-D-PVAC - 9	0.981849	X	0.307644	0.161330
3	BK-LA-D-PVAC 5 - LEPENÉ	0.328040	0.307644	X	0.638446
4	BK-LA-D-PVAC-9 - LEPENÉ	0.170636	0.161330	0.638446	X

Příloha č. 2 Konečné testy významnosti**Tabulka č. 7 Konečný test významnosti pro chord modul**

Effect	SS	Stupeň uvolnění	MS	F	P
Absolutní člen	5902258990.86	1.00	5902258990.86	2423.182	0.000000
Interakce vybraných faktorů	3082221.41	3.00	1027407.14	0.422	0.737709
Chyba	282546714.45	116.00	2435747.54		

Tabulka č. 8 Konečný test významnosti pro mez pevnosti

Effect	SS	Stupeň uvolnění	MS	F	P
Absolutní člen	17642502059.21	1.00	17642502059.21	3109.80	0.00
Interakce vybraných faktorů	41326995.38	3.00	13775665.13	2.43	0.07
Chyba	658090583.14	116.00	5673194.68		

Tabulka č. 9 Konečný test významnosti pro střední hodnotu

Effect	SS	Stupeň uvolnění	MS	F	P
Absolutní člen	5590166386.62	1.00	5590166386.62	2294.29	0.00
Interakce vybraných faktorů	3122061.29	3.00	1040687.10	0.43	0.73
Chyba	282640593.17	116.00	2436556.84		

Tabulka č. 10 Konečný test významnosti pro mez úměrnosti

Effect	SS	Stupeň uvolnění	MS	F	P
Absolutní člen	8592952509.72	1.00	8592952509.72	2954.40	0.00
Interakce vybraných faktorů	10059022.66	3.00	3353007.55	1.15	0.33
Chyba	337388835.21	116.00	2908524.44		

Příloha č. 3 Technický list skelná tkanina



KITTFORT PRAHA
Horňátky 1
277 11 Neratovice

SKELNÁ TKANINA

Název výrobku

Skelná tkanina 355 g/m²

Skelná tkanina 500g/m²

Složení

Chemicky inertní sklo povlečené ochrannou vrstvou org. polymerů

Odstín

Bílošedá

Použití

Používá se ve spojení s pryskyřicí lamit 109 k opravám laminátových předmětů.

Bezpečnost a ochrana zdraví

Není nebezpečnou látkou.

První pomoc

Při zdravotních potížích, při náhodném požití a zasažení očí, vždy vyhledejte lékaře a poskytněte mu informace z etikety.

Při zasažení očí: vyplachovat 10 až 15 minut čistou vodou.

Vzhled

bílá skelná tkanina

Balení

0,5m²

80 m² role

Záruční doba v původních obalech záruční doba neomezená.

Příloha č. 4 Technický list uhlíkové tkaniny



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: **C0047101**

Material Code: TOR001901
 Material Designation: **CC 160 P - 120**
 Manufacturing Date: 12.3.2014
 Article no.: CA0031-841-0001
 Test roll No.: C0047101
 Finish: loomstate

 Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex
 Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex
 Compatibility: Epoxi resin
 Binding: plain

Results of specific tests according to Specification No.:							TOR001901
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note	
Sett of warp	n/m	400	395	410	* 400	DIN EN 1049-2	
Sett of weft	n/m	400	395	410	* 400	DIN EN 1049-2	
Thickness	mm	0,3	0,28	0,34	* 0,34	DIN EN 5084	
Area weight	g/m2	160	155	170	160	DIN EN 12127	
Width	cm	120	119,5	120,5	* 120,4	DIN EN 1773	
Density	g/cm3	1,76					
* orientation value							
Corresponds to the batch no.: C00471							



Address of Manufacturer:
 KORDÁRNA Plus a.s.
 695 74 Velká nad Veličkou 890
 Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528
 + 420 518 329 302, kucera.j@kordarna.cz

AG-COLL 8761/L D3

Popis produktu: Jednozložkové kopolymérne disperzné lepidlo s výbornou odolnosťou voči vode, ktoré spĺňa požiadavky normy DIN - EN 204 pre lepidlá kategórie D3. Špeciálne určené pre lepenie dreva pre interiérové prvky umiestnené vo vlhkých miestnostiach.

Technické údaje:

Viskozita [mPas]:	5000-7000 pri 23°C
Obsah sušiny [%]:	49-51
Hustota [g/cm ³]:	0,9-1,1 pri 23°C
pH:	3,8-4,5
Farba:	biela, mliečna

Doporučený spôsob spracovania:

Optimálne podmienky použitia lepidla AG-COLL 8761/L D3 – pre dosiahnutie DIN - EN 204 odolnosť D3:

Teplota materiálu, prostredia a lepidla [°C]:	18-22
Vlhkosť dreva [%]:	8-12
Relatívna vlhkosť vzduchu [%]:	65 – 75
Nános lepidla:	jedno alebo dvojstranný
Množstvo [g/m ²]:	150 – 180
Otvorený čas [min]:	15
Lisovací tlak [N/mm ²]:	0,2 až 0,8
Lisovací čas [min]:	15 až 20

Vhodné na lepenie mäkkého a tvrdého dreva, na lepenie laminátových a melamínových papierov na drevotriesku, MDF a taktiež pri výrobe nábytku do kúpeľne a kuchyne, kde sa požaduje odolnosť voči vlhkosti.

Balenie: 30 kg vedro, 1100 kg kontajner

Skladovanie: Minimálna doba uskladnenia v originálnych a dobre uzatvorených obaloch v suchom a chladnom prostredí (5 - 20°C) je 12 mesiacov od vyskladnenia. Teplota skladovania by nemala prekročiť 25°C počas skladovania. Držte ďalej od zdrojov tepla.

Informácie k použitiu:

Pri lepení tvrdého dreva je potrebné použiť materiál s konštantnou vlhkosťou a kvalitným opracovaním, aby sa predišlo zníženiu kvality spoja a výslednej odolnosti voči vlhkosti. Na dosiahnutie maximálnej odolnosti voči vlhkostimalo by byť lepidlo nanesené na oba lepené povrchy. Maximálna odolnosť voči vode je dosiahnutá po 7 dňoch. Veľmi nízke teploty negatívne vplyvajú na lisovací čas. Prebytok vlhkosti dreva (>12%) spomaľuje čas vytvrdzovania lepidla z čoho vyplýva dlhší lisovací čas. Lisovací čas závisí od podmienok prostredia a od typu použitých materiálov. Vyvarujte sa kontaktu lepidla s farebnými kovmi (napr. zinok, mosadz, cín, meď, hliník a i.), pretože môžu dôjsť ku sfarbeniu lepidla. AG-COLL 8761/L D3 je od výroby pripravený k použitiu. Následné

Informácie uvedené v tomto technickom prospekte sú založené na praktických skúsenostiach a výsledkoch našich laboratórnych testov. Hodnoty sú priebežne aktualizované podľa posledného stavu technológie. Toto vydanie nahrádza všetky doterajšie vydania a je platné od uvedeného dátumu.

Příloha č. 6 Software pracující s MKP (Zdroj: www.github.com/kostyfisik/FEA-compare 12.2.2019)

	Software	Funkce	Vývojář	Verze	Vydáno	Licence	Operační podpora
1	Agros2D	Multipatformní open source aplikace pro řešení fyzických problémů založených na Hermesově knihovně	Západočeská univerzita v Plzni	3.2	03/03/2014	GNU GPL	Linux , Windows
2	Předprocesor ANSA	Pokročilý software předběžného zpracování CAE pro kompletní sestavení modelu.	BETA			Proprietární komerční software	Linux , MacOS X , Windows
3	CalculiX	Jedná se o projekt Open Source FEA. Řešitel používá	Guido Dhondt, Klaus Wittig	2.14	27/04/2018	GNU GPL	Linux , Windows
4	DIANA FEA	Balíček konečných prvků pro všeobecné použití, využívány inženýry pro stavebnictví, stavebnictví a geotechniku.	DIANA FEA BV, Nizozemsko	10.1	14/11/2016	Komerční	Windows , Linux
5	deal.II	Komplexní sada nástrojů pro kódy konečných prvků, škálování z notebooků do clusterů s více než 10 000 jádry. Napsáno v jazyce C ++.	Wolfgang Bangerth, Timo Heister, Guido Kanschat, Matthias Maier et al.	9.0	12/05/2018	LGPL	Linux , Unix , MacOS X , Windows
6	DUNA	Distribuované a sjednocené numerické prostředí, napsané v jazyce C ++	Tým vývojářů DUNE	2.4.1	29/02/2016	GPL verze 2 s výjimkou běhu	Linux , Unix , MacOS X
7	Elmer	Open source multiphysical simulační software vyvinutý finským ministerstvem školství CSC, psaný primárně v Fortran (psaný v Fortran90, C a C ++)	CSC	8.2	15/03/2016	GPL	Linux , MacOS X , Windows
8	FEBio	Konečné prvky pro biomechaniku	Univerzita Utah (MRL), Columbia univerzita (MBL)	2.7	Duben 2018	Zvyk	Linux , MacOS X , Windows
9	Projekt FEICS	Softwarový balíček vyvinutý americkými a evropskými vědeckými s cílem umožnit automatizované řešení diferenciálních rovnic	Tým FEICS	1.6.0	29/07/2015	LGPL (Core) & GPL /LGPL (Non-Core) ^[1]	Linux , Unix , MacOS X , Windows
10	FEATool Multiphysics	Matlab a GNU Octave simulační nástroj FEM PDE	Přesná simulace	1.8	17/05/2018	Vlastní smlouva EULA	Windows , MacOS X , Linux , Unix
11	Femap	Konečný prvek před a po zpracování	Software Siemens	11.4.0	16/09/2016	Proprietární komerční software	Okna
12	FreeFem ++ ^[3]	FreeFem ++ je bezplatný a otevřený paralelní software	Univerzita Sorbonne ^[4] a Jacques-Louis Lions Laboratory ^[5]	3.61	20/06/2018	LGPL	Linux , MacOS , Windows , Solaris
13	GOMA	GOMA je open-source, paralelní a škálovatelný multiphysics softwarový balíček pro modelování a simulaci fyzických procesů v reálném životě, se základem v dynamice výpočetní tekutiny pro problémy s vyvíjející se geometrií.	Sandia National Laboratories , University of New Mexico	6.1	28. srpna 2015	Verze GPL	Linux
14	GetFEM ++	Obecná knihovna konečných prvků napsaná v jazyce C ++ s rozhraními pro Python , Matlab a Scilab . Zaměřuje se na modelování kontaktní mechaniky a diskontinuit (např. Trhliny).	Yves Renard, Julien Pommier	5	2015-07	LGPL	Unix , MacOS X , Windows
15	Hermesův projekt	Modulární C / C ++ knihovna pro rychlý vývoj adaptivních hp-FEM řešitelů	skupina hp-FEM	3	01/03/2014	LGPL	Linux , Unix , MacOS X , Windows
16	Mathematica ^[6]	Výpočetní software pro všeobecné použití.	Wolfram Research	11.3.0 (8. března 2018 ; před 12 měsíci) ^[7]	Pravidelně	Proprietární	Linux , MacOS X , Windows , Raspbian , Online služba.
17	MFEM	MFEM je bezplatná, lehká, škálovatelná C ++ knihovna pro metody konečných prvků, která obsahuje libovolné sítě a prostory s konečnými prvky s vysokým řádem, podporu pro širokou paletu diskretizací a důraz na použitelnost, obecnost a efektivitu výpočetního výkonu.	Tým MFEM	3.4	29/05/2018	LGPL-2.1 s	Linux , Unix , MacOS X , Windows
18	MoFEM JosePH	Mesh Orientovaný hp-FE kód, psaný v C ++	Univerzita Glasgo	0,6,8	16/11/2017	LGPL	Unix , MacOS X
19	OOFEM	Objektově orientovaný Řešitel Konečného EleMentu, napsaný v C ++.	Božek Patzák	2.4	15/02/2016	Verze GPL	Unix , Windows
20	OpenSees	Otevřený systém pro inženýrskou simulaci zemětřesení				Neobchodní	Unix , Linux , Windows

21	SESAM (FEM)	Souprava softwaru pro strukturální a hydrodynamickou analýzu lodí a pobřežních struktur	DNV GL		pravidelně	Proprietární , SaaS	Windows , webový prohlížeč
22	Rozsah Software	Multiphysics konečný prvek analýza software	Tomáš Šoltys	3	30/04/2018	GPL	Linux , Windows
23	Z88 / Z88Aurora	Balíček konečných prvků Freeware; Současná verze Z88Aurora V4 nabízí kromě modulů statické pevnostní analýzy, jako jsou nelineární výpočty pevnosti (velké posuny), simulace s nelineárními materiály, přirozenou frekvencí, statickou tepelnou analýzou a kontaktním modulem.	Frank Rieg	Z88 V15, Z88Aurora V4	2017-07-17, 2017-04-24	GNU GPL, Custom	Linux , Windows , Mac OS X
24	Abaqus	Pokročilý Franco-USA software od SIMULIA , vlastněný Dassault Systemes	Abaqus Inc.	6.14-AP	2014-11	Proprietární komerční software	Linux , Windows
25	CONSELF	Simulace CAE z vašeho prohlížeče	CONSELF SRL	2.9	2015-10	SaaS	webový prohlížeč
26	FreeCAD	FreeCAD je parametrický 3D modelář s přídatným modulem FEM		0,16,670	2016-07	LGPL	Linux , Windows , Mac OS X
27	HyperMesh	Konečný prvek před a po zpracování. (Hypermesh je produkt v sadě HyperWorks)	Altair			Proprietární komerční	Linux , Mac OS
29	ADINA	Software s konečnými prvky pro konstrukční, kapalinové, přenos tepla, elektromagnetické a více fyzikální problémy, včetně interakce kapalina-struktura a termomechanická vazba	Výzkum a vývoj Adina			Proprietární komerční software	
30	Advance Design	BIM software pro FEM strukturní analýzu, včetně mezinárodních designových eurokódů	GRAITEC	2014	2013-09	Proprietární komerční software	
31	Simulace Autodesk	Finite Element software společnosti Autodesk	Autodesk			Proprietární komerční software	Okna
32	ANSYS	Kompletní softwarový balíček CAE se sídlem v USA	Ansys Inc.	19.2	18/09/2018	Proprietární komerční software	Windows , Linux
33	COMSOL Multiphysics	Software pro analýzu konečných prvků COMSOL Multiphysics (dříve FEMLAB)	COMSOL Inc.	5.3	25/04/2017	Vlastní smlouva EULA	Linux , Mac OS X , Windows , webový prohlížeč
34	CosmosWorks	Součást SolidWorks	Dassault Systèmes SolidWorks Corp.			Proprietární komerční software	Okna
35	Quickfield		Tor Cooperative	6.1	22/12/2015	Vlastní smlouva EULA	Okna
36	LS-DYNA	Nejnámější pro explicitní dynamiku / crash analýzu	LSTC - Livermore softwarová korporace technologie	R8,0	2015-03	Proprietární komerční software	Linux , Windows
37	Nastran	Původně vyvinutý pro NASA , nyní dostupný komerčně	MSC NASTRAN	2014	2014	Vlastní smlouva EULA	Linux , Mac OS X , Windows
38	RFEM	3D software pro analýzu konečných prvků	Software Dlubal	5,06	2016-02	Proprietární komerční software	Okna
39	SimScale	Německá 100% webová CAE platforma	SimScale GmbH	14	2013-07	SaaS	webový prohlížeč
40	VisualFEA	Software konečných prvků pro konstrukční, geotechnický, přenos tepla a analýzu průsaků	Intuice Software	5.11	2016-01	Proprietární	Mac OS X , Windows
41	JCMSuite	Software konečných prvků pro analýzu elektromagnetických vln, pružnosti a vedení tepla	JCMwave GmbH	3.6.1	27/01/2017	Vlastní smlouva EULA	Linux , Windows
42	JMAG	2D a 3D software pro analýzu konečných prvků pro elektromagnetické pole, tepelné, strukturní	JSOL	18,0	2019-02	Proprietární komerční software	Linux , Windows , webový prohlížeč
43	StressCheck	Software pro analýzu konečných prvků založený na p-FEM se zaměřením na aplikace pevné mechaniky	ESRD, Inc.	10.4	2018-04	Proprietární komerční software	Okna