

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra základního zpracování dřeva

Experimentální testování nábytkových spojů z listnatého dřeva

Diplomová práce

Autor: Bc. Jakub Šulc

Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jakub Šulc

Dřevařské inženýrství

Název práce

Experimentální testování nábytkových spojů z listnatého dřeva

Název anglicky

Experimental verification of furniture joints from hardwood

Cíle práce

1. Teoretický rozbor problematiky
2. Na vybraných typech nábytkových spojů experimentálně ověřit mechanické vlastnosti
3. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na pevnost spojů
4. Experimentální výsledky budou analyzovány pomocí výpočtových modelů metody konečných prvků (MKP)
5. Porovnání výsledků experimentálních měření a výpočtových modelů (MKP)

Metodika

1. Experimentální měření bude realizované pomocí certifikovaných trhacích strojů
2. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na mechanické vlastnosti spojů bude pomocí softwaru STATISTICA
3. V simulačních programech se bude provádět statická analýza spojů pomocí metody konečných prvků

Doporučený rozsah práce

70

Klíčová slova

nábytkový spoj, MKP výpočtový model, experimentální test

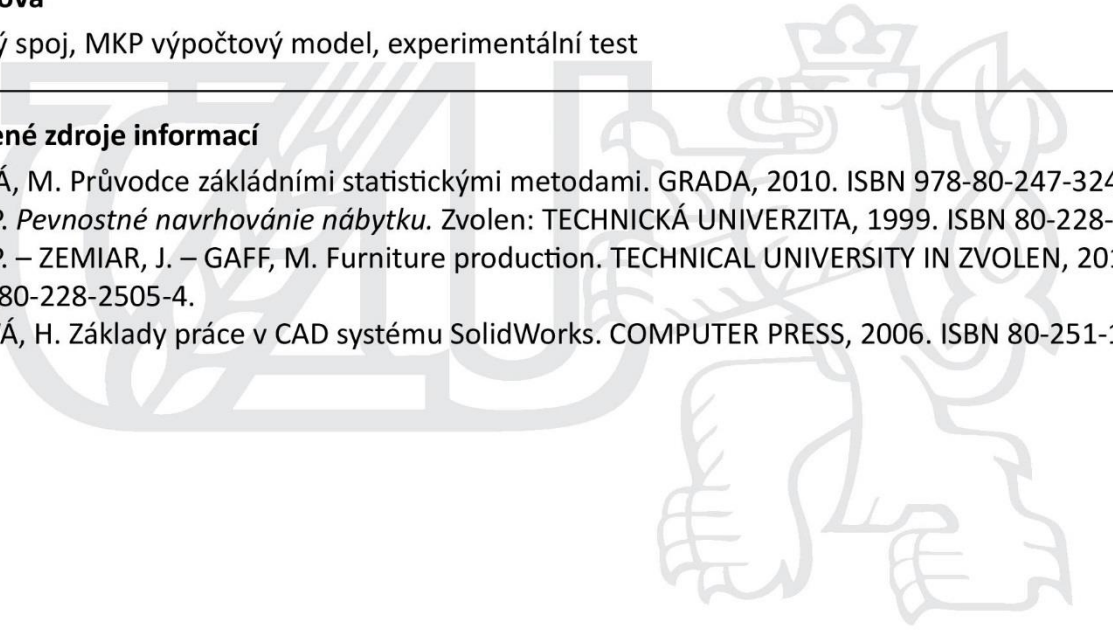
Doporučené zdroje informací

BUDÍKOVÁ, M. Průvodce základními statistickými metodami. GRADA, 2010. ISBN 978-80-247-3243-5.

JOŠČÁK, P. *Pevnostné navrhovanie nábytku*. Zvolen: TECHNICKÁ UNIVERZITA, 1999. ISBN 80-228-0921-7.

JOŠČÁK, P. – ZEMIAR, J. – GAFF, M. Furniture production. TECHNICAL UNIVERSITY IN ZVOLEN, 2013. ISBN 978-80-228-2505-4.

VLÁČILOVÁ, H. Základy práce v CAD systému SolidWorks. COMPUTER PRESS, 2006. ISBN 80-251-1314-0.



Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Elektronicky schváleno dne 13. 5. 2016

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 1. 2017

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 13. 04. 2017

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Experimentální testování nábytkových spojů z listnatého dřeva vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vlastimila Borůvky, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové 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 20. 4. 2017

Jakub Šulc

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Vlastimilu Borůvkovi, PhD. za vstřícné a odborné vedení, cenné rady a veškerý čas, který mi ochotně věnoval. Dále bych rád poděkoval Ing. Danielu Rumanovi, PhD. za pomoc se simulacemi. Dále tímto děkuji Ing. Tomáši Holečkovi za pomoc při přípravě zkušebních vzorků.

Autor je vděčný za podporu Celouniverzitní interní grantové agentury (CIGA) Fakulty lesnické a dřevařské, projekt č. 2016 – 4311. Tato práce je součástí komplexního výzkumu v rámci tohoto projektu.

Abstrakt

Experimentální testování nábytkových spojů z listnatého dřeva

Tato práce se zabývá posouzením vlivu vybraných faktorů na elastickou tuhost rohového nábytkového spoje. Jedná se o prostorový kolíkový spoj z bukového dřeva imitující spojení lubů se sloupkem. Sledované faktory byly typ namáhání, typ lepidla, průměr spojovacích kolíků a úhel letokruhů.

Spojovací prostředek představovaly standardní bukové kolíky o průměru 8 a 12 mm fixované disperzním polyvinylacetátovým a polyuretanovým lepidlem. Vzorky byly podrobeny tlakovému a tahovému namáhání v úhlové rovině. Dále byla provedena simulace deformace a průběhu napětí na rohovém spoji metodou konečných prvků (MKP) v programu SolidWorks, jejíž výsledky se porovnávaly s výsledky experimentálního testování.

Z vyhodnocení vybraných faktorů byl zjištěn statisticky významný vliv na elastickou tuhost u průměru použitých kolíků a kombinace typu namáhání a typu lepidla. Úhel letokruhů, typ namáhání ani typ lepidla neměly samostatně na elastickou tuhost statisticky významný vliv. Ze simulace deformace vyplývá, že při bezproblémovém průběhu zkoušky byla reálná deformace podobná deformaci simulované.

Klíčová slova:

Nábytkový spoj, MKP výpočtový model, experimentální test.

Abstract

Experimental verification of furniture joints from hardwood

This work aims to assess the impact of selected factors on the elastic stiffness of corner joint in furniture. The item in question is a spatial dowel joint made of beech wood that imitates a rails with a stile. Evaluated factors included type of loading, type of glue, dowel diameter and the angle of annual rings.

Standard beech dowels of 8 or 12 mm diameter served as the coupling device, while dispersive polyvinyl acetate glue and single-component polyurethane glue were used for the fixation. The samples were tested with compressive and tensile loading in the angular plane. Subsequently, simulation of deformation and stress distribution was conducted on a sample corner joint by the finite element method (FEM) using simulation software SolidWorks. Results of this simulation were then compared to results of experimental testing.

The analysis of selected factors showed with statistical significance that the elastic stiffness is dependent on the dowel diameter, as well as on the combination of the type of loading and the type of glue. Separately, the angle of annual rings, the type of loading and the type of glue did not have any statistically important impact on the elastic stiffness of the joint. Furthermore, samples with rundown without complication, the really observed deformation was similar to the deformation provided by simulation.

Key words:

Furniture joint, FEM computational model, experimental test.

Obsah

Seznam obrázků.....	10
Seznam grafů.....	11
Seznam tabulek, použitých zkratk a symbolů.....	12
1 Úvod.....	15
2 Cíle práce	16
3 Rozbor problematiky.....	17
3.1 Spoje používané ve výrobě nábytku.....	17
3.1.1 Rozdělení spojů.....	18
3.1.2 Lepené spoje.....	20
3.1.2.1 Kolíkové spoje	20
3.1.2.2 Další typy lepených spojů.....	26
3.1.3 Testování spojů	31
3.2 Teorie lepení.....	33
3.2.1 Proces lepení	33
3.2.2 Složky lepidla.....	36
3.2.3 Vytvrzování lepidel.....	37
3.2.4 Rozdělení lepidel.....	39
3.2.5 Použití lepidel v dřevozpracujícím průmyslu	40
3.2.5.1 PVAc lepidlo.....	41
3.2.5.2 PUR lepidlo.....	42
3.2.6 Technologické faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje	42
3.3 Stavba a vlastnosti dřeva	44
3.3.1 Buk lesní	44
3.3.2 Fyzikální vlastnosti dřeva	45
3.3.3 Mechanické vlastnosti dřeva	47
3.3.3.1 Pružnost	50
3.3.3.2 Pevnost.....	51
3.3.3.3 Tuhost	52
3.4 Počítačové simulace	54
3.4.1 Metoda konečných prvků.....	55
3.4.1.1 Podstata metody konečných prvků	56
3.4.1.2 Postup řešení MKP	56
3.4.2 SolidWorks.....	58
4 Metodika	60
4.1 Příprava zkušebních vzorků	60

4.2	Zjišťování úhlu letokruhů.....	63
4.3	Zkoušení vzorků.....	64
4.4	Měření šířky letokruhů.....	65
4.5	Použité výpočty.....	65
4.6	Simulace zatěžování.....	68
4.7	Statistické zpracování dat.....	70
5	Výsledky.....	73
5.1	Výsledky měření.....	73
5.2	Statistické vyhodnocení.....	74
5.3	Grafy průběhu zkoušky.....	79
5.4	Výsledky počítačové simulace.....	86
6	Diskuze.....	89
7	Závěr.....	95
8	Seznam literatury a použitých zdrojů.....	97

Seznam obrázků

Obrázek 1 Spoje s rovnoběžnými základními směry (Joščák a kol., 2014).....	19
Obrázek 2 Spoje s kolmými základními směry (Joščák a kol., 2014).	19
Obrázek 3 Typy kolíků.....	22
Obrázek 4 Kolíkový spoj na pokos	22
Obrázek 5 Nastavovací spoje	23
Obrázek 6 Prostorové spoje na tupo s překříženými kolíky	24
Obrázek 7 Geometrické parametry prutového (rámového) spoje	24
Obrázek 8 Geometrické parametry rohového (středového) spoje pro DTD	25
Obrázek 9 Folding systém (Nutsch, 2012).....	26
Obrázek 10 Dřevěná lamela (www.festool.cz)	28
Obrázek 11 Domino pero (www.festool.cz)	28
Obrázek 12 Hoffmanova rybina (www.haefele.de).	28
Obrázek 13 Čepové spoje.....	29
Obrázek 14 Rybinové ozuby (www.publi.cz).....	30
Obrázek 15 Druhy namáhání spojů.....	31
Obrázek 16 Zkušební schéma deformace	32
Obrázek 17 Úhel smáčení	35
Obrázek 18 Druhy lepidel používaných ve výrobě nábytku	39
Obrázek 19 Buk, příčný řez (Zeidler, 2012)	44
Obrázek 20 Buk, radiální řez (Zeidler, 2012)	44
Obrázek 21 Buk, tangenciální řez (Zeidler, 2012).....	44
Obrázek 22 Obecný tvar pracovního diagramu (podle Požgaj a kol., 1997).	49
Obrázek 23 Modelový pracovní diagram.....	52
Obrázek 24 Geometrie rohového spoje s 8 mm kolíky.....	61
Obrázek 25 Geometrie rohového spoje s 12 mm kolíky.....	61
Obrázek 26 Schéma pro určení úhlu letokruhů (podle Záborský a kol., 2017). ...	63
Obrázek 27 Uchycení vzorku do zkušebního stroje.....	64
Obrázek 28 Zjednodušené schéma zatěžování vzorků.....	65
Obrázek 29 Model rohového spoje.	68
Obrázek 30 Síť konečných prvků na modelu	69
Obrázek 31 Porušení spoje v kolíku (lub).....	80

Obrázek 32 Porušení spoje v kolíku (sloupek).	80
Obrázek 33 Povytažení kolíku	81
Obrázek 34 Prasklina na čelní straně sloupku.....	81
Obrázek 35 Simulace deformace při tahovém namáhání, 8 mm kolíky.	86
Obrázek 36 Simulace deformace při tlakovém namáhání, 8 mm kolíky.	86
Obrázek 37 Simulace deformace při tahovém namáhání, 12 mm kolíky.	87
Obrázek 38 Simulace deformace při tlakovém namáhání, 12 mm kolíky.	87
Obrázek 39 Průběh napětí při tlakovém namáhání, 12 mm kolíky.....	88
Obrázek 40 Průběh napětí při tahovém namáhání, 12 mm kolíky.....	88
Obrázek 41 Schéma zatěžování stolu (podle ČSN 91 0100.....	91
Obrázek 42 Zatěžovací zkouška židle (Kasal et al., 2016b).....	91

Seznam grafů

Graf 1 Závislost hustoty na šířce letokruhů.	74
Graf 2 Závislost elastické tuhosti na úhlu letokruhů.....	75
Graf 3 Vztah mezi elastickou tuhostí a tuhostí při maximálním zatížení.	76
Graf 4 Vliv typu namáhání na elastickou tuhost.	77
Graf 5 Vliv typu lepidla na elastickou tuhost.....	77
Graf 6 Vliv typu lepidla a typu namáhání na elastickou tuhost.	78
Graf 7 Vliv průměru kolíků na elastickou tuhost.....	78
Graf 8 Vliv průměru kolíků a typu namáhání na elastickou tuhost	79
Graf 9 Vliv průměru kolíků a typu lepidla na elastickou tuhost.....	79
Graf 10 Tahové namáhání, PVAc lepidlo, 8 mm kolíky	81
Graf 11 Tahové namáhání, PVAc lepidlo, 8 mm kolíky (2).....	81
Graf 12 Tahové namáhání, PUR lepidlo, 8 mm kolíky.....	82
Graf 13 Tahové namáhání, PUR lepidlo, 8 mm kolíky (2).....	82
Graf 14 Tahové namáhání, PVAc lepidlo, 12 mm kolíky.	82
Graf 15 Tahové namáhání, PVAc lepidlo, 12 mm kolíky (2).....	82
Graf 16 Tahové namáhání, PUR lepidlo, 12 mm kolíky.	83
Graf 17 Tahové namáhání, PUR lepidlo, 12 mm kolíky (2).....	83
Graf 18 Tlakové namáhání, PVAc lepidlo, 8 mm kolíky.	84
Graf 19 Tlakové namáhání, PVAc lepidlo, 8 mm kolíky (2).....	84

Graf 20 Tlakové namáhání, PUR lepidlo, 8 mm kolíky.	84
Graf 21 Tlakové namáhání, PUR lepidlo, 8 mm kolíky (2).....	84
Graf 22 Tlakové namáhání, PVAc lepidlo, 12 mm kolíky.	85
Graf 23 Tlakové namáhání, PUR lepidlo, 12 mm kolíky.	85
Graf 24 Vztah mezi elastickou tuhostí a tuhostí při maximálním zatížení (Záborský a kol., 2017).	93
Graf 25 Vliv průměru kolíku na tuhost (Warmbier a Wilczynski, 2000).	94
Graf 26 Vliv rozteče kolíků na tuhost (Warmbier a Wilczynski, 2000).....	94

Seznam tabulek

Tabulka 1 Technické parametry použitých lepidel.	63
Tabulka 2 Hodnoty vlastností bukového dřeva použité pro simulaci.	69
Tabulka 3 Výsledky hustoty a elastické tuhosti rohových spojů 73	73
Tabulka 4 Průměrné hodnoty úhlů a ohybových momentů 74	74
Tabulka 5 Souhrnné výsledky analýzy rozptylu. 77	77
Tabulka 6 Porovnání výsledků se Záborským a kol. (2017)..... 92	92

Seznam použitých zkratk a symbolů

\bar{x}	- aritmetický průměr prvků v souboru
C	- tuhost
C_{elast}	- elastická tuhost
E_{tL}	- modul pružnosti v tlaku podél vláken
E_{tR}	- modul pružnosti v tlaku v radiálním směru
E_{tT}	- modul pružnosti v tlaku v tangenciálním směru
F	- zatěžující síla
FEM	- finite element method (FEM=MKP)
F_{max}	- síla na mezi pevnosti
G_{LR}	- smykový modul pružnosti ve směru radiálně podélném
G_{LT}	- smykový modul pružnosti ve směru tangenciálně podélný
G_{RT}	- smykový modul pružnosti ve směru radiálně tangenciálním
H_0	- nulová hypotéza

- l₀ - délka ramena síly
- m - hmotnost tělesa
- M - ohybový moment
- m₀ - hmotnost absolutně suchého dřeva
- MKP - metoda konečných prvků
- M_{max} - maximální ohybový moment dosažený při maximální zatěžovací síle
- m_w - hmotnost při vlhkosti w
- m_w - hmotnost při vlhkosti w
- n - počet prvků v souboru
- R - korelační koeficient
- R² - koeficient determinace
- S - směrodatná odchylka
- S₂ - rozptyl
- V - objem tělesa
- V - variační koeficient
- V_w - objem při vlhkosti w
- w - vlhkost
- γ - původní úhel mezi luby
- ΔF - rozdíl síly při 10 a 40 % maximálního zatížení
- ΔM - rozdíl momentu při 10 a 40 % maximálního zatížení
- Δγ - změna úhlu
- ρ₁₂ - hustota dřeva při 12% vlhkosti
- ρ_w - hustota při vlhkosti w
- σ_{||} - pevnost v tlaku ve směru vláken
- σ_{⊥LR} - pevnost v tlaku kolmo na vlákna v radiálním směru
- σ_{⊥LT} - pevnost v tlaku kolmo na vlákna v tangenciálním směru
- σ_{⊥LR} - pevnost v tahu kolmo na vlákna v radiálním směru
- σ_{⊥LT} - pevnost v tahu kolmo na vlákna v tangenciálním směru
- μ_{LR} - Poissonovo číslo při tlaku napříč vláken v radiálním směru prodloužení ve směru vláken
- μ_{LT} - Poissonovo číslo při tlaku napříč vláken v tangenciálním směru prodloužení ve směru vláken

- μ_{RL} - Poissonovo číslo při tlaku ve směru vláken prodloužení v radiálním směru
- μ_{RT} - Poissonovo číslo při tlaku napříč vlákem v tangenciálním směru
prodloužení v radiálním směru
- μ_{TR} - Poissonovo číslo při tlaku napříč vlákem v radiálním směru prodloužení
- μ_{TL} - Poissonovo číslo při tlaku ve směru vláken prodloužení v tangenciálním
směru
- σ_k - mez kluzu
- $\sigma_{||}$ - pevnost v tahu podél vláken
- $\tau_{LR\perp}$ - pevnost ve smyku napříč vlákem v radiální rovině
- $\tau_{LR||}$ - pevnost ve smyku ve směru vláken v radiální rovině
- $\tau_{LT||}$ - pevnost ve smyku ve směru vláken v tangenciální rovině

1 Úvod

V životě člověka hraje téměř nezastupitelnou roli dřevo, které se díky svým vlastnostem využívá k nejrůznějším účelům. Vysoká pevnost a nízká váha předurčují dřevo ke konstrukčním účelům, zatímco jeho estetická rozmanitost je ceněná při výrobě dekoračních materiálů, šperků apod. Dřevo lze najít v nejrůznějších odvětvích od stavebnictví, přes nábytek a výrobu papíru až k výrobě šperků nebo párátek. Velký potenciál dřeva je v jeho obnovitelnosti a při správném využívání i nevyčerpatelnosti.

Své zastoupení dřevo historicky našlo ve výrobě nábytku. Nábytek byl vždy úzce spojený s životem člověka, který se jím obklopoval a dovytvářel si tak své prostředí. Velkou změnu do výroby nábytku přinesl rozvoj materiálů na bázi dřeva, které dokáží z méně kvalitního dřeva vyrobit materiál s vysokou užitnou hodnotou. Současné trendy v nábytkářské výrobě ukazují nábytek jako spotřební materiál, který láká převážně svou cenou. Masivní dřevo se kvůli ceně a větší náročnosti opracování nahrazuje právě materiály na bázi dřeva. Přesto je dřevo z historického hlediska a pro své užitné vlastnosti stále vyhledávaným a využívaným materiálem.

Cílem výroby nábytku by mělo být vytvořit vysoce funkční objekt s estetickou hodnotou, který zároveň bude dostatečně bezpečný při používání. S bezpečností nábytku jdou ruku v ruce pevnostní charakteristiky jednotlivých částí. Jde převážně o spoje dvou a více prvků, které tvoří nejslabší místo nábytku a ve kterých dochází k případnému porušení. V dnešní době hromadné výroby a vysokých požadavků hraje bezpečnost důležitou roli. Z tohoto hlediska je důležité neustále doplňovat nové informace a vědomosti o pevnosti a tuhosti jednotlivých částí, které mohou být využity při navrhování a dimenzování nábytku.

2 Cíle práce

Cílem této práce je posouzení vlivu typu namáhání, typu lepidla, průměru spojovacích kolíků a úhlu letokruhů na elastickou tuhost rohového nábytkového spoje. Jedná se o prostorový kolíkový spoj z bukového dřeva, který imituje spojení lubů se sloupkem, resp. nábytkovou nohou.

Hlavním cílem je statisticky vyhodnotit vliv vybraných faktorů v programu Statistica. Dalším cílem je provést simulaci zatěžování rohového spoje v programu SolidWorks Simulation metodou konečných prvků a získané výsledky porovnat s výsledky experimentálního měření.

3 Rozbor problematiky

3.1 Spoje používané ve výrobě nábytku

Spojování dílců v nábytkářském průmyslu je velmi důležitá oblast výroby. Spoje dřeva a materiálů na bázi dřeva jsou nejslabší místa nábytku a většinou jsou primární příčinou poruchy (Nandanwar et al., 2013).

Konstruování nábytku můžeme rozdělit na spojování materiálu jednoho druhu za účelem zvětšení rozměrů a spojování dílců a součástek do větších celků. Při spojování do větších rozměrů se jedná především o podélné nastavování (nekonečné vlysy), šířkové nastavování (spárovka) nebo tloušťkové nastavování (lamela, překližka). Cílem je vytvoření konkrétního dílce, nebo dále zpracovávaného polotovaru. Dalším důvodem spojování dílců a součástek do složitějších celků i s využitím nedřevěných mechanismů (pojezdy, kování, aj.), (Halabala, 1982).

Ve výrobě nábytku, konkrétně při montáži do finální podoby, se využívá různých typů spojů. Lze využít jako spojovacího prostředku lepidlo, nebo jiné spojovací prvky, které pro fixaci lepidlo nevyžadují. Jde o tzv. suchou montáž. Suchou montáží se rozumí spojení jednotlivých dílců tak, aby spojovacím prvkem nebylo lepidlo, ale konstrukční úprava, popř. mezičlánek, který umožňuje vhodné spojení. Volba suché montáže může být z důvodu praktických nebo ekonomických. V praxi se objevují tři případy suché montáže (Halabala, 1982).

1. Výrobek je dodáván v demontovaném stavu a jeho montáž je provedena až u cílového spotřebitele. Výhodou je možnost opětovné demontáže a montáže. Využívá se u stavebnicových nábytků).
2. Výrobek je dodáván v demontovaném stavu a montáž je provedena u spotřebitele. Nepočítá se s jeho opětovnou demontáží a montáží. Výhodou v tomto a prvním případě je úspora nákladů na skladovací prostor, manipulaci a dopravu.
3. Výrobek je dodáván ve smontovaném stavu a není předpoklad demontáže před dopravou, ani během užívání. Tato možnost je vhodná pouze tehdy, pokud přináší praktický nebo ekonomický význam ve výrobě např. zrychlením nebo zjednodušením spojování.

3.1.1 Rozdělení spojů

Konstrukční spoje nábytku lze rozdělit podle několika kritérií. Podle tvaru dílců se dělí na spoje prutů, spoje desek (plošných dílců) a spoje desek a prutů. Dále se mohou dělit podle polohy spojovaných dílců, z hlediska anizotropie, podle principu spojování jednotlivých dílů apod. Podle polohy spojovaných dílců se spoje dělí na (Joščák a kol., 2014):

1. Nastavovací spoje:

- a) spoje konstrukčních prvků prut – prut nebo deska – deska,
- b) spoje konstrukčních prvků prut – deska.

2. Úhlové spoje:

- a) rohové spoje (na tupo, na pokos),
- b) středové spoje (jednostranné, obojstranné),
- c) křížové spoje (šikmé, kolmé).

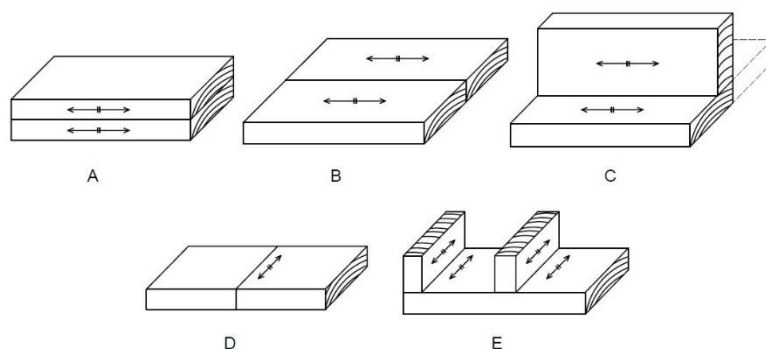
Nastavovací spoj představuje spojení dvou nebo více prvků, jejichž osy (popř. středové roviny) jsou rovnoběžné. Jedná se o spojení na délku, šířku, tloušťku nebo jejich kombinací. Úhlový spoj představuje spojení dvou nebo více prvků, jejichž osy (popř. středové roviny) nejsou rovnoběžné. Jedná se o spoje kolmé a šikmé. Rohový spoj vzniká na koncích spojovaných prvků a jejich osy (popř. středové roviny) svírají nenulový úhel. Provedení spojů může být na tupo nebo na pokos. Středový spoj představuje spojení prvků, jejichž osy (popř. středové roviny) svírají nenulový úhel a alespoň jeden prvek nekončí v místě spoje. Křížový spoj představuje spojení prvků, jejichž osy (popř. středové roviny) svírají nenulový úhel a alespoň dva prvky nekončí v místě spoje. Spoj na tupo je vytvořen prvky, jejichž plochy vytvářejí styčné roviny spoje. Spoj na pokos má styčné roviny spoje vytvořené zkosením obou spojovaných prvků (Joščák a kol., 2014).

Konstrukci spojů ovlivňují mj. anizotropické vlastnosti dřeva, tedy různé rozměrové změny v hlavních směrech vlivem vlhkosti. Ve spojích, kde jsou základní směry na sebe kolmé, je nutné zabezpečit buď volný pohyb dílců (např. nelepený svlak) nebo vytvořit spoj s takovou pevností, která zamezí rozměrovým změnám (Drápela a kol., 1980).

Z hlediska anizotropie dřeva se spoje dělí na (Joščák a kol., 2014):

1. Spoje s rovnoběžnými základními směry:

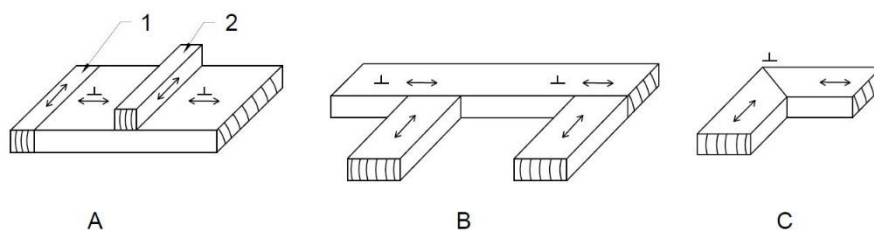
- a) spoje v podélné rovině: na tloušťku (A), na šířku (B), úhlové spoje rohové a středové (C),
- b) spoje v příčné rovině: spoje na délku (D),
- c) spoje v podélné a příčné rovině: úhlové spoje rohové a středové (E).



Obrázek 1 Spoje s rovnoběžnými základními směry (Joščák a kol., 2014).

2. Spoje s kolnými základními směry:

- a) spoje v podélné rovině: svlaky (A1),
- b) spoje v podélné a příčné rovině: okrajnice (A2), úhlové spoje rohové a středové (B),
- c) spoje v podélně-příčné rovině: úhlové rohové spoje na pokos (C).



Obrázek 2 Spoje s kolnými základními směry (Joščák a kol., 2014).

Z hlediska docílení základního požadavku na lepení (pevnosti spoje) je nejvhodnější spojení podélného dřeva s podélným (v podélné rovině) při stejné orientaci obou ploch ve vztahu k průběhu vláken. Při spojování příčného dřeva s příčným nebo podélným je pevnost menší. Zvýšení pevnosti lze dosáhnout profilováním, čímž se zvýší kontaktní plocha (Zemiar a kol., 2009).

Z hlediska principu spojování jednotlivých dílců lze spoje rozdělit na (Joščák a kol., 2011):

- lepené spoje,
- mechanické spoje,
- spoje tavitelnými plasty,
- svařované spoje,
- kombinované spoje.

Tato práce je zaměřená na experimentální testování rohových nábytkových spojů, jejichž dílce jsou spojeny na tupo pomocí vlepených kolíků. Z toho důvodu se v následující části zaměřím konkrétněji na problematiku lepených kolíkových spojů. Ostatní způsoby lepených spojů používaných na výrobu nábytku jsou z důvodu velké obsáhlosti tématu zmíněny jen doplňkově.

3.1.2 Lepené spoje

Lepené spoje používají jako hlavní spojovací prostředek jednotlivých dílců lepidlo. Pevnost spoje je vytvořena pomocí adhezivní síly (přilnavost k povrchu) a kohezní síly lepidla (soudržnost). Spoj vzniká spojením dvou, popř. více dílců k sobě pomocí lepidla s tím, že dílce jsou konstrukčně připraveny na vzájemné spojení (čepové spoje, spoje na ozuby, aj.). Druhou možností je využití vloženého dřevního nebo nedřevního komponentu, který pomáhá spoj fixovat (vložené pero, kolíky, aj.).

Při využívání lepidla jako spojovacího prostředku je většinou nutné spoj fixovat než dojde k vytvrzení lepidla, nebo dosažení potřebné manipulační pevnosti spoje. Nejběžnější používaná lepidla jsou na bázi polyvinylacetátu. Mezi přednosti lepených spojů patří univerzálnost a nižší cena v porovnání s jinými spojovacími prostředky (Drápela a kol., 1980).

3.1.2.1 Kolíkové spoje

Kolíkový spoj je jeden z nejjednodušších a nejčastějších způsobů spojování dílců. Hodí se nejen pro masivní dřevo, ale také pro materiály na bázi dřeva (DTD apod.). Kolíkový spoj se stal nejpoužívanějším typem spojení hlavně kvůli

možnosti automatizace ve velkých výroбах a nízké ceně, ačkoli není nejpevnějším typem spojení (Trávník a Svoboda, 2007).

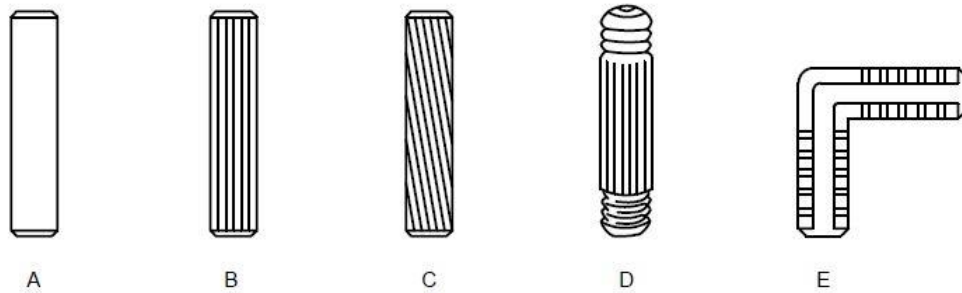
Kvalitu spoje ovlivňuje (Trávník a Svoboda, 2007):

- dřevina a kvalita dřeva kolíku,
- povrchové tvarování kolíku,
- lepení kolíku,
- vlhkost prostředí,
- přesnost opracování a čistota konstrukčního otvoru,
- počet a rozměry kolíků.

Na výrobu kolíků se používá bezvadné dřevo s dobrými mechanickými vlastnostmi. Nejvhodnější je bukové a březové dřevo. Lze se setkat i se smrkovými kolíky, ty mají ale menší pevnost. Kromě dřeva se používá na výrobu kolíků i plast (polystyren, polyetylen). U dřevěných kolíků se vyskytují tři způsoby povrchové struktury. Hladký povrch, podélně rýhovaný povrch a spirálovitě rýhovaný povrch (viz obr. 3). Rýhování na povrchu umožňuje odvod vzduchu z konstrukčního otvoru, zvětšuje lepenou plochu a zabraňuje stírání lepidla z plochy konstrukčního otvoru a kolíku při aplikaci. Rýhované kolíky mají v porovnání s hladkými kolíky o cca 10 % větší pevnost. Nejvhodnější jsou kolíky spirálově rýhované, protože rýhy vznikají lisováním. Oproti tomu podélně rýhované kolíky mají dřevní vlákna narušena rýhováním a vykazují menší pevnost. Z výše uvedených důvodů jsou kolíky s hladkým povrchem pro lepení nevhodné (Drápela a kol., 1980; Josten a kol., 2011).

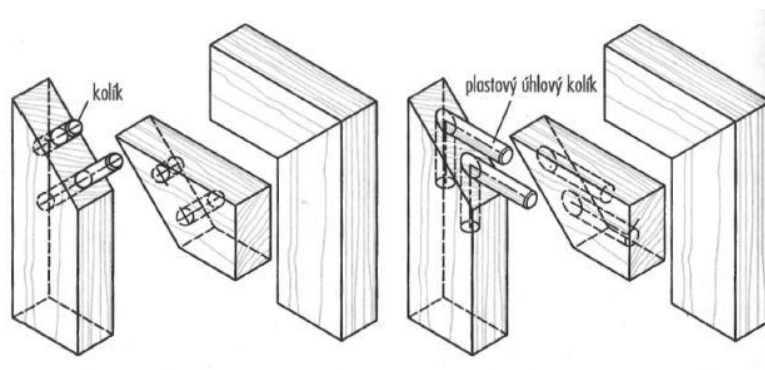
Průměr kolíku s podélným nebo spirálovitým rýhováním by měl být ideálně o 0,2 – 0,3 mm větší než průměr zhotoveného konstrukčního otvoru. Pevnost je vyšší u kolíku s menší vlhkostí než spojovaný materiál. Kolík absorbováním vody z lepidla nabobtná a kompenzuje tím smrštění lepidla. Konstrukční otvor by měl být hladký bez vytrhaných vláken a spálených míst, které snižují adhezi lepidla (Drápela a kol., 1980).

Pokud tvoří kolík hlavní spoj zabezpečující pevnost a tuhost, používá se v kombinaci s lepidlem. V některých případech může kolík sloužit pouze jako vodící prvek zabezpečující polohu dílců, pevnost a tuhost spoji dodává mechanický spoj, např. excentr, konfirmát apod.



Obrázek 3 Typy kolíků: A) s hladkým povrchem, B) s podélně rýhovaným povrchem, C) se spirálově rýhovaným povrchem, D) plastový rovný kolík, E) plastový úhlový kolík (podle Josten a kol., 2011).

Spoje pomocí kolíků se často využívají při spojování deskových materiálů i prutových konstrukcí. Pod pojmem prut se označuje dílec, kde jeho délka je výrazně větší než příčné rozměry. Mezi pruty lze zařadit nohy, luby, trnože, vlysy rámu apod. (Joščák, 1999). Spojení pomocí kolíků může být na tupo nebo na pokos. Ke spojení na pokos seříznutých dílců je možné použít klasické kolíky, nebo se v tomto případě používají kolíky úhlové. Aby se využila co možná nejvíce délka klasického kolíku, otvory jsou vrtány kolmo k ploše pokosu a kolíky se umisťují co nejbližší k vnitřní straně. V tomto případě je vhodnější použití úhlových kolíků. Ty se vyrábějí z plastu a ramena spolu svírají úhel 90 %. Rozměry uhlových kolíků (průměr x délka ramena) jsou 6 x 25 a 8 x 25/30 mm (Nutsch, 2012).

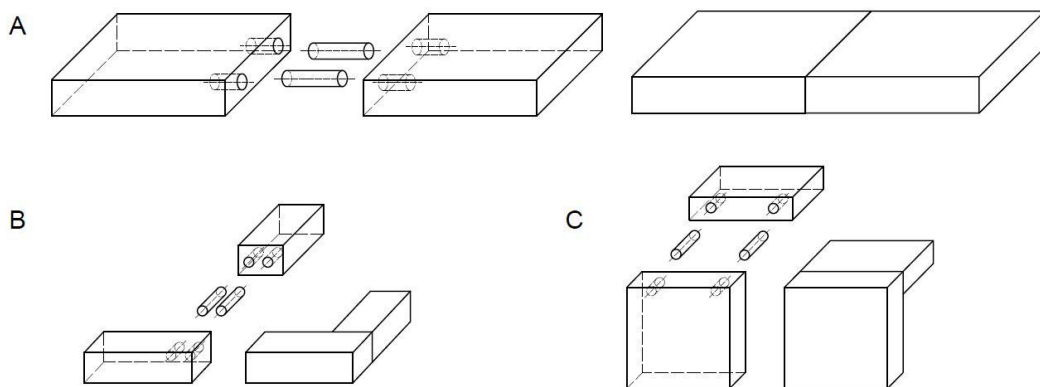


Obrázek 4 Kolíkový spoj na pokos pomocí rovných kolíků (vlevo) a úhlových kolíků (vpravo), (Nutsch, 2003).

Spojení pomocí kolíku lze rozdělit na (Joščák a kol., 2011):

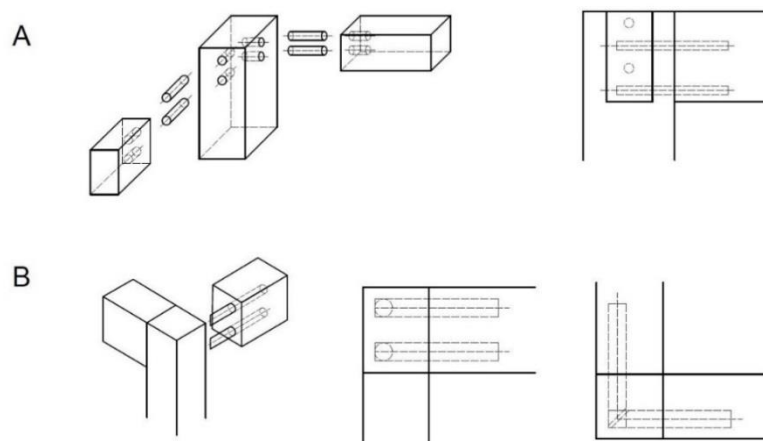
- nastavovací spoje,
- rovinné spoje,
- prostorové spoje.

Nastavovací spojení je za účelem zvětšení celku. U nastavování prutů jde převážně o nastavování délkové, u desek jde o nastavování délkové, popř. šířkové. Rovinnými spoji se rozumí rohové s středové spoje prutů a desek. Může se jednat jak o spojení na tupo, tak o spojení na pokos. Kolíkové spoje jsou využívány hojně i prostorových spoji (Joščák a kol., 2011).



Obrázek 5 Nastavovací spoje (A), rovinné spoje prutů (B), rovinné spoje desek (C), (podle Joščák a kol., 2011).

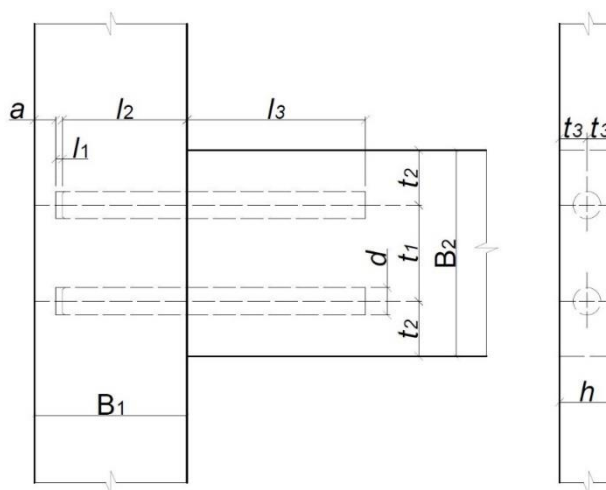
Nejběžnější příklad prostorového spoje je spojení sloupku (např. noha u židle, stolu) a lubů. Na obrázku 6 jsou znázorněny prostorové spoje na tupo pomocí kolíků. Z důvodu využití délky kolíku se kolíky ve sloupku překřížují a mohou být zapouštěny hlouběji do materiálu. Pokud není dostatek místa na překřížení kolíků ve sloupku, mohou se kolíky použít kolíky zaříznuté na pokos (Nutsch, 2012).



Obrázek 6 Prostorové spoje na tupo s překříženými kolíky (A) a s kolíky zaříznutými na pokos (B), (podle Joščák a kol., 2011).

Geometrie kolíkových spojů

Při výrobě prutových nebo deskových konstrukcí s využitím kolíků se spoje řídí určitými požadavky. Kromě obecných požadavků na kolíky (povrch, dřevina, průměr, aj.) jsou i požadavky na geometrii kolíkových spojů. Geometrické požadavky pro prutové (rámové) a deskové spoje jsou znázorněny na obrázcích 7 a 8.



Obrázek 7 Geometrické parametry prutového (rámového) spoje (podle Joščák a kol., 2011).

Geometrické parametry prutového (rámového) spoje (Joščák a kol., 2011).

Průměr kolíku: $d = (0,4 - 0,6)h$

Hloubka otvoru v průběžném rameni: $l_2 = (4 - 4,5)d$

Hloubka otvoru ve styčném rameni: $l_3 = \min l_1 = (4 - 4,5)d$

Délka kolíku: $l = l_2 + l_3 = (8 - 9)d$

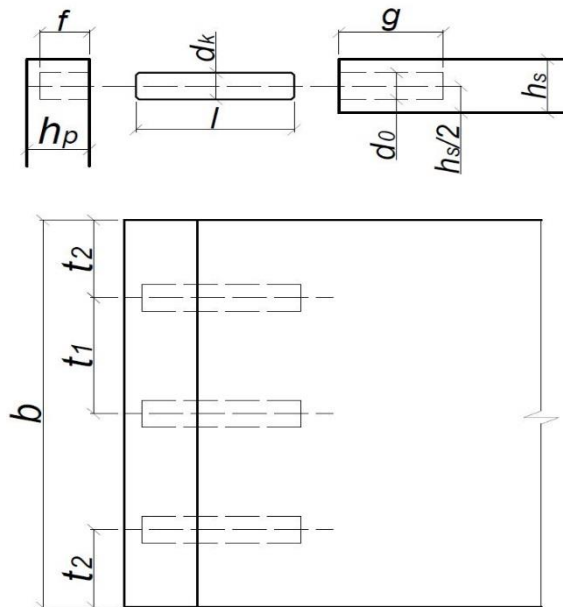
Odstup osy kolíku od kraje: $t_2 = t_3 = (0,83 - 1,25)d$

Rozteč os kolíků: $t_1 = \min 2t_2 = \min (1,66 - 2,5)d$

Šířka průběžného ramene: $B_1 = a + l_1 + l_2 = (4 - 4,5)d + 5$

$(a = \min 4; l_1 = \min 1)$

Šířka styčného ramene: $B_2 = 2t_2 + t_1 = (3,33 - 5)d$



Obrázek 8 Geometrické parametry rohového (středového) spoje pro DTD (podle Joščák a kol., 2011).

Geometrické parametry rohového (středového) spoje pro DTD (Joščák a kol., 2011).

Průměr kolíku a otvoru: $d_k, d_o = h_s + 1,2$

Podle dostupných průměrů kolíků se volí nejbližší vyšší.

Hloubka otvoru v průběžném rameni: $f = h_p - 3$

Hloubka otvoru v styčném rameni: $g = 1,5f$

Délka kolíku: $l = f + g - 2$

Odstup osy kolíku od kraje: $a_{opt} \geq t/2$; $a_{min} \geq h_s + d$

Počet kolíků: $n = \frac{b-(2xt2)}{t} + 1$

Rozteč os kolíků: $t = 8d$

Rozteč kolíků je při strojovém zpracování 25 nebo 32 mm. Vzdálenost je daná roztečí vrtáků v kolíkovacích strojích. Častěji se používá násobku 32 mm. Při spojování masivních desek (např. mezistěna, dno skříně) je vhodné volit co nejmenší vzdálenost kolíků, aby se zamezilo tvarovým změnám vlivem měnící se vlhkosti (Nutsch, 2012). V případě spojování prutů jsou rozteče kolíků individuální. Použitím jednoho kolíku by mohlo dojít k otočení dílce kolem osy kolíku. Aby se otáčení zamezilo, jsou potřeba minimálně dva kolíky. Rozteče v takovém případě jsou závislé na šířce styčného ramene spoje (Joščák, 1999).

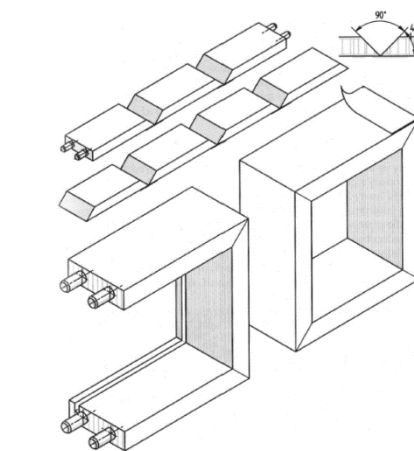
Kolíkový spoj je jeden z nejčastějších způsobů spojování dílců ve výrobě nábytku. Kromě vlepených kolíků se používá ve výrobě nábytku celá řada dalších lepených spojů. Z důvodu velké obsáhlosti jsou uvedeny okrajově, v některých případech doplněné o ilustrační obrázky.

3.1.2.2 Další typy lepených spojů

Spoje na tupou spáru

Spojení na tupo představuje jeden z nejjednodušších typů spojení. Spoj vzniká přiložením rovinných ploch prvků a vhodnou fixací lepidlem. Tímto typem spoje lze nastavovat délkově, tloušťkově i šířkově. Příkladem využití ve výrobě nábytku jsou např. spárovky nebo lepené hranoly na výrobu oken. Speciálním případem využití je folding systém (Joščák a kol., 2014).

Folding systém se využívá při výrobě zásuvek, malých korpusů skříňového nábytku, apod. Podstata systému je v tom, že celý odvod (např. zásuvky) je jeden rovinný dílec, do kterého jsou vyfrézovány drážky pod



Obrázek 9 Folding systém (Nutsch, 2003)

úhlem 90°. Připravený dílec se následně složí do finálního tvaru většinou tří nebo čtyřstranného korpusu. V případě některých dých a reaktoplastických fólií musí být profrézování úplné. Místo frézování se podlepuje páskou, která drží dílec pohromadě. Termoplastické fólie a některé dýhy nemusejí být profrézovány úplně aby nedošlo k oddělení jednotlivých částí. Systém folding využívá k fixaci částí dva druhy lepidel. V první fázi se do 2/3 tloušťky spáry nanese disperzní PVAc lepidlo. Těsně před slisováním se z vnitřní strany nanese tavné lepidlo a korpus se slisuje. Díky použití tavného lepidla spoj rychle získá manipulační pevnost a konečnou pevnost zajišťuje PVAc lepidlo. Použitím pouze PVAc lepidla se zvyšuje časová náročnost. (Uhlíř, 1997).

Spoje na polodrážku

Polodrážka je konstrukční nebo dekorační útvar na dílci, jehož příčný průřez je ohraničený ze dvou stran a jeho délka je podstatně větší, než příčné rozměry. Při spojení na polodrážku je alespoň jeden ze spojovaných dílců polodrážkou opatřen. Tento typ spoje se využívá k šířkovému nastavování a k rohovým spojům. Pro zvýšení pevnosti může být spoj opatřen vlepenými spojovacími prvky (např. kolíky) nebo mechanickými spojovacími prvky (Joščák a kol., 2014).

Přeplátování

Přeplátování je jeden z nejjednodušších spojů, ale také jeden z nejméně pevných. Spoj vytvořený pomocí plátu, který je vytvořen zmenšením tloušťky, popř. šířky na obou spojovaných dílcích. Spojovat přeplátováním lze rohové, středové, křížové a podélné spoje. Pevnost zajišťuje pouze lepená plocha, která se v některých případech zajišťuje dřevěnými kolíky nebo jinými mechanickými prostředky (Josten a kol., 2011).

Spoje na pero

Spoje na pero se rozdělují na spoje na vlastní pero a vložené pero. Vlastní pero je konstrukční útvar jednoho ze spojovaných dílců, který je geometricky uzpůsoben drážce v druhém dílci. Spoje na vlastní pero a drážku se využívají nejčastěji na spojení desek, méně spojení prutů, popř. spojení desek a prutů. Pera zvyšují styčnou plochu dílců a tedy větší lepenou plochu. Pero a drážka se používá

často v kombinaci se spojovacím kováním při suché montáži (Joščák a kol., 2011; Halabala, 1982).

Tvar pera může být hranatý, zaoblený, klínový nebo rybinový. Drážka musí vždy rozměrově odpovídat peru. Drážka je hloubkový konstrukční nebo dekorační útvar na ploše povrchu dílce, přičemž jeho délka je podstatně větší než příčné rozměry. Šířka drážky a pera při spojení na šířku je 1/3 tloušťky spojovaného prvku (desky) a hloubka zapuštění (šířka pera) 1/2 tloušťky. U rohových a středových spojů je šířka drážky 1/4 – 1/3 tloušťky spojovaného materiálu a hloubka zapuštění 1/4 – 4/10 tloušťky pro jednostranně odsazené pero. Pruty se na pero a drážku spojují např. na pokos nebo v prostorovém spoji pomocí rybinového pera (Joščák a kol., 2011).

Podobné spojení jako vlastní pero nabízí spojení na pero vložené. Jelikož pero není konstrukční útvar spojovaného dílce, tvary, rozměry a materiály na vložená pera jsou různorodá. Spojované dílce mají drážku, do které se vkládá pero a spoj je fixován lepidlem. Spoje na vložené pero se využívají jak při spojování desek, tak prutů.

Mezi nejběžnější druhy vložených per patří příčné a podélné hranaté, podélné zaoblené, elipsovité, trojúhelníkovité, úhlové, rybinové a další (Joščák a kol., 2011). Vložená pera mohou být z různých dřevěných i nedřevěných materiálů. Používají se tvrdé dřeviny, překližky, tvrdé DVD, plasty nebo kovy. Konkrétní typy vložených per jsou uvedeny dále (Vassiliou a Barboutis, 2008).



Obrázek 10 Dřevěná lamela
(www.festool.cz).



Obrázek 11 Domino pero
(www.festool.cz).



Obrázek 12 Hoffmanova
rybina (www.haefele.de).

Lamely jsou speciální vložená pera, eliptického tvaru. Výhoda spočívá v absenci průběžné drážky, ale drážka je frézovaná speciálně na tvar lamely a nechává prostor pro drobné posuny. Díky tomu nemusí být drážka v přesném

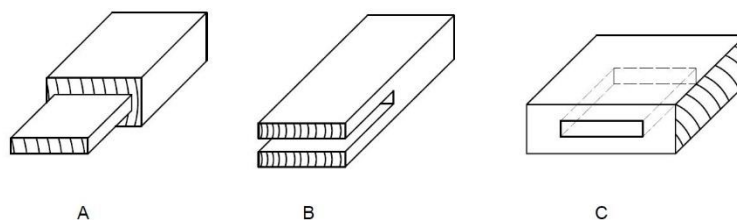
místě, ale dovoluje jisté vůle (Nutsch, 2012). Lamely jsou vyráběny z masivního dřeva, většinou buku, překližky, tvrdých vláknitých desek, plastu nebo kovu. Dřevěné lamely jsou mírně komprimované, absorbují vodu z lepidla, čímž mírně zvětší svou tloušťku a lépe fixují spoj. Plastové a kovové lamely lze použít jako nerozebíratelný prolepený spoj, nebo mohou tvořit demontovatelný spoj (Vassiliou a Barboutis, 2008).

Konkrétním případem podélného zaobleného pera je domino pero. Jedná se o v podstatě o dřevěný kolík (bukový) s oválným průřezem vyvinutý společností Festool. Povrch je opatřen rýhováním pro lepší rozvod lepidla v lepené ploše. Princip spojování je obdobný jako u kolíkových spojů. Výhoda domina pera/kolíku je ve velikosti lepené plochy a odolnosti proti otáčení použitím jediného kusu. Domina pera se využívají při spojování desek i prutů (www.festool.cz).

Rybinový tvar vloženého pera mají tzv. Hoffmannovo rybinu. Spojované dílce mají v sobě vyfrézovanou rybinovou drážku, do které je pak vsunuté pero. Oproti ostatním typům vloženého pera je možné použít Hoffmannovo rybinu i bez lepení. Materiál na výrobu je převážně plast (ABS, PA), může být použito i dřevo (buk, dub, jasan, maranty), popř. překližka, nebo kov. Hoffmannovo rybinu se využívají ke spojování převážně prutů (www.epimex.sk; www.drevvari.sk).

Čepové spoje

Čepové spoje jsou ve výrobě nábytku rozšířeným typem spojení. Používají se pro spojování zejména prutů. Čepové spoje se rozdělují na čep – dlab a čep – rozpor. Podle tvaru se čepy dělí na hranaté a oválné. Čepy jsou vloženy do připraveného konstrukčního otvoru (vyfrézovaný, vyvrtaný, vydlabaný). Čepových spojů se využívá při spojení širších dílců, trnoží, lubů apod. Někdy jsou doplněny perem a drážkou za účelem omezení kroucení (Zemiar a kol., 2009).



Obrázek 13 Čepové spoje: čep (A), rozpor (B), dlab (C), (pole Joščák a kol., 2014).

Čep a rozpor je pevné a často používané rohové spojení. Lze však vytvářet i podélné a středové spoje. Rozpor se zhotovuje většinou na dlouhém nebo svislém dílci a čep na kratším nebo příčném. Čep může být jednoduchý nebo dvojité. Čep a rozpor nebo dlab je možné doplnit dalšími fixačními prostředky, které zabraňují povolení spoje. Mohou se použít kolíky, klíny apod. (Nutsch, 2012).

Ozuby

Pro zvýšení lepené plochy mezi spojovanými dílci a vyšší pevnosti a tuhosti spoje je možné použít ozubových spojů. Na ozuby lze spojovat prutové i deskové dílce. Na jednom dílci se vytvoří ozuby a na druhém ozubové zářezy, které geometrií dovolují těsné propojení spojovaných materiálů. Druhy ozubů můžeme podle tvaru dělit na obdélníkové, rovnoběžníkové, klínové a rybinové.

Mezi nejpoužívanější patří pro svoji jednoduchost ozuby obdélníkové a rybinové. Používají se na převážně ke spojování plošných dílců (zásuvky, korpusy skříní apod.) na rohové a středové spoje. Někdy jsou označovány jako sdružené čepy.

Dalším druhem jsou ozuby klínové, jejichž profil je klínovitého tvaru. Podle délky ozubů se dělí na ozuby normální délky (10 – 20 mm), miniozuby (6 – 8 mm) a mikroozuby (2 – 3 mm). Klínovými ozuby je možné vytvářet šířkové, rohové a délkové spoje. Největší využití mají u podélného nastavování při výrobě nekonečných vlysů (KVH hranoly).



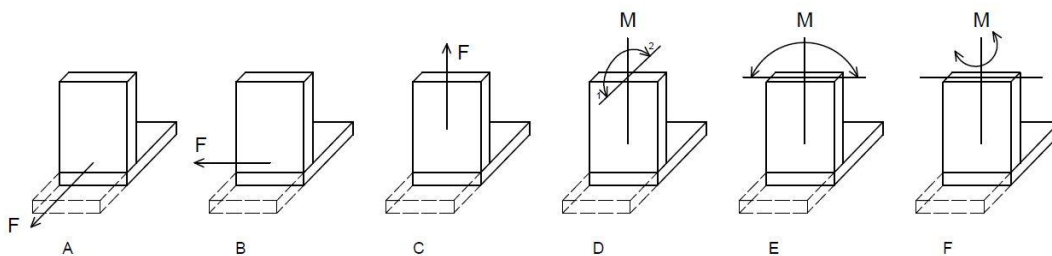
Obrázek 14 Rybinové ozuby
(www.publi.cz).

Posledním druhem ozubů jsou ozuby rybinové, které se využívají převážně ke spojování desek. Lze je rozdělit na otevřené, polokryté a kryté. Výhoda je vysoká pevnost spoje, ale vyšší pracnost na výrobu oproti jiným druhům ozubů (Joščák a kol., 2011).

3.1.3 Testování spojů

Mezi základní prvky kvality nábytku patří funkčnost, estetika a technická kvalita. Tyto prvky by měly být harmonické. Funkčnost je definována jako schopnost výrobku plnit požadavky uživatele za předpokládaných podmínek a okolností. Jako estetiku lze považovat schopnost uspokojit estetické potřeby člověka. Do technické kvality, která úzce souvisí s bezpečností využívání lze zařadit pevnost, trvanlivost a spolehlivost (Joščák, 1999).

K dosažení technické kvality je potřeba konstrukci vhodně dimenzovat. Při využívání nábytku jsou jednotlivé spoje v nábytkových konstrukcích v prostoru namáhané třemi silami (dvě smykové a tahová síla) a třemi momenty sil (dva ohybové a krouticí moment). Na obrázku 15 jsou síly a momenty schématicky zobrazeny. Nejnebezpečnější případ namáhání nábytkových spojů je zatížení ohybovým momentem v úhlové rovině (Joščák a kol., 2011).

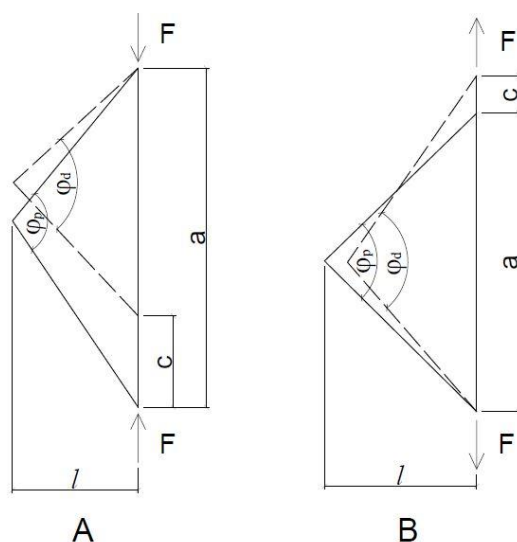


Obrázek 15 Druhy namáhání spojů: A) smyk v úhlové rovině, B) smyk v příčné rovině, C) namáhání na vytáhnutí, D) ohyb v úhlové rovině (1 – tah, 2 – tlak), E) ohyb v příčné rovině, F) namáhání v krutu (podle Joščák, 1999).

Jednotlivé části konstrukce jsou zatěžované jiným druhem namáhání. Např. u lubů, noh, spojovacích a vyztužovacích vlysů u stolového nábytku je požadována pevnost a tuhost v ohybu. U sedacího nábytku jsou u lubů, noh a trnoží kladeny stejné požadavky a u spojení nohy (sloupku) s lubem je požadovaná únosnost a tuhost při namáhání ohybovým momentem.

Pro získání potřebných znalostí o chování spojů při působení namáhání jsou prováděny zkoušky. Testování spočívá v podrobení konstrukce, resp. jejích prvků a spojů, vnějšímu zatížení. Výzkumy v tomto směru věnují největší pozornost buď celé konstrukci, nebo jejím částem, převážně spojům (Joščák, 1999). Právě spoje jsou většinou nejslabší místa konstrukce, ve kterých vzniká primární příčina poruchy (Nandanwar et al., 2013).

Joščák (1999) a Joščák a kol., (2011) stanovuje metody testování celých konstrukcí nábytku a jednotlivých spojů. Jelikož v této práci jsou testované rohové nábytkové spoje v úhlové rovině, jsou dále uvedeny pouze metody testování těchto spojů.



Obrázek 16 Zkušební schéma deformace spoje při namáhání v tlaku (A) a v tahu (B), kde F je síla, l je rameno síly z původního tvaru tělesa, φ_p , φ_d je úhel před zatížením (původní tvar) a po zatížení (deformovaný tvar), a je rozpětí ramen, c je posunutí ramen spoje (podle Joščák a kol., 2011).

Na obrázku 16 jsou zobrazena schémata zkoušek spojů v ohybu v úhlové rovině namáhané tlakem a tahem. Ze získaných údajů jsou následně vypočítané ohybové momenty sil a tuhost celého spoje. Postup testování spojů v této práci probíhal podle těchto schémat. Metodika zpracování je popsána v kap. 4.

Cílem práce je posouzení vlivu vybraných faktorů na elastickou tuhost rohových nábytkových spojů. Jedním ze zkoumaných faktorů je typ lepidla použitého na fixování kolíků ve spoji. Proto je následující část práce věnována teorii lepení, včetně popisu použitých lepidel (polyvinylacetátové a polyuretanové).

3.2 Teorie lepení

Lepení slouží ke spojení dvou a více stejnorodých nebo různých materiálů (adherendů) pomocí lepidla (adheziva). Lepidla jsou převážně látky kapalné, popř. pevné, které v procesu lepení přecházejí do tekutého nebo plastického stavu a dokáží vytvořit dostatečně pevný lepený spoj mezi materiály. Lepením vzniká trvalý nerozebíratelný spoj, který neovlivňuje vlastnosti spojovaných materiálů (Eisner a kol., 1983). V současné době představuje technologie lepení jednu z nejprogresivnějších metod spojování nejrůznějších materiálů. Nahrazuje tak v mnoha případech klasické mechanické spoje (Muzikář a kol., 2008).

První průmyslově vyráběná lepidla se objevila v 17. století na území Nizozemska, Anglie a Německa. Jednalo se o lepidla na bázi živočišných klišů vyráběných ze zvířat. Po druhé světové válce, kdy začal rozmach plastů, byla živočišná lepidla postupně nahrazována lepidly syntetickými. V dnešní době živočišná lepidla nalézají jen úzké spektrum použití, např. v restaurátorství hudebních nástrojů (David a Kratochvíl, 1986).

3.2.1 Proces lepení

Kvalitu lepeného spoje určují především vlastnosti lepidla a správné postupy při aplikaci a vytvrzování. V procesu lepení probíhají v lepidle fyzikální a chemické procesy, které vedou k vzniku trvalého spojení dvou materiálů. Základní fyzikální a chemické vlastnosti, které ovlivňují použitelnost lepidla a výslednou pevnost lepeného spoje jsou (Uhlíř, 1997):

- mezimolekulární síly,
- adheze,
- koheze,
- smáčivost,
- reologie.

Mezimolekulární síly

Jednotlivé atomy jsou navzájem spojeny v molekuly pomocí chemických vazeb, tzv. primárními silami. Seskupením atomů vznikají molekuly, které se navzájem přitahují silami mezimolekulárními. Tyto síly jsou označovány jako

sekundární. Mezimolekulární síly hrají důležitou roli v hlavních vlastnostech lepidla, tj. přilnavosti lepidla k materiálu (adhezi) a vnitřní soudržnosti lepidla (kohezi), (Muzikář a kol., 2008).

Adheze

Základní požadavek na lepidlo je jeho dobrá přilnavost k povrchu jiného tělesa. Tato schopnost se nazývá adheze. Vzájemná přilnavost mezi dvěma látkami je způsobena mezimolekulárními přitažlivými silami. Vznik adheze popisují dvě základní teorie. Starší teorie mechanické adheze a novější teorie specifické adheze, která je založena na fyzikálních a chemických silách (Muzikář a kol., 2008).

Teorie mechanické adheze vysvětluje pevnost lepeného spoje vnikáním lepidla do nerovností, popř. pórů dřeva, ve kterých vytvrdne a vytvoří mikroskopické mechanické vazby. Tato teorie byla překonána pokusy, při nichž byla zjištěna větší přilnavost mezi hladkými povrchy neporézních materiálů, než mezi porézními. Vniknutí lepidla do materiálu se podílí na celkové pevnosti spoje pouze z 10 – 20 % (David a Kratochvíl, 1986).

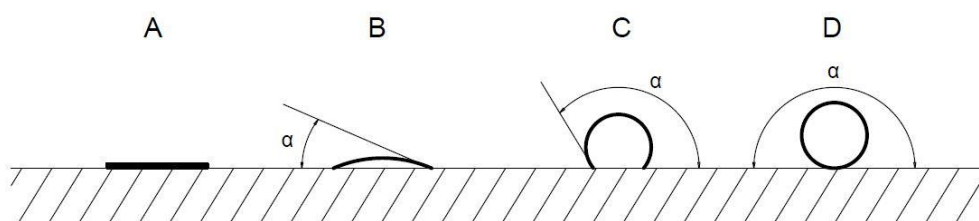
Specifická adheze je založena na vzájemném působení fyzikálních a chemických sil. Adhezi ovlivňuje řada fyzikálních a chemických veličin, např. viskozita lepidla, povrchové napětí lepidla a lepeného materiálu, polarita, difuze mezi povrchem materiálu a lepidlem a jiné. Povaha specifické adheze je vysvětlována různými teoriemi. Mezi nejrozšířenější lze zařadit adsorpční teorii, která vysvětluje adhezi působením Van der Waalsových sil, elektrickou teorii založenou na působení elektrických potenciálů mezi molekulami a difuzní teorii, která je založena na vnikání segmentů makromolekul lepidla do molekul lepeného materiálu a jejich vzájemným zaklesnutím. Každá z teorií o vzniku adheze platí pouze pro určité případy lepení, a tedy nevysvětluje komplexní proces. Jedná se však o složitý proces fyzikálních a chemických interakcí mezi adherendem a adhezivem. (Drápela a kol., 1980).

Smáčivost

Adhesivní síly působí na velmi krátkou vzdálenost. Pro uplatnění těchto sil je potřeba molekuly spojovaných materiálů k sobě přiblížit na vzdálenost menší než

zhruba 3 – 4 nm, čehož u dřeva není možné dosáhnout. Proto je výhodné použít tekutých lepidel, které vyrovnají povrchy a dostanou se na potřebnou vzdálenost k povrchu lepeného materiálu. Obecně platí, že čím je tenčí vrstva lepidla, tím jsou lepší vlastnosti lepené spáry (David a Kratochvíl, 1986).

Schopnost smáčet povrch pevných látek je jedna z nejdůležitějších vlastností lepidla, která ovlivňuje výslednou pevnost spoje. Smáčivost je charakterizována úhlem α , který svírá kapka kapaliny (lepidla) a pevná látka (dřevo). Čím menší je úhel, tím lépe kapalina smáčí povrch (Muzikář a kol., 2008).



Obrázek 17 Úhel smáčení: A) úplné smáčení povrchu, B) částečné smáčení povrchu, C) málo smáčený povrch, D) zcela nesmáčený povrch (podle Uhlíř, 1997).

Úhel smáčivosti je ovlivňován povrchovým napětím kapaliny a pevné látky. Každá kapalina má snahu minimalizovat svůj povrch a zaujmout tvar koule. Při styku kapaliny a pevné látky podléhají molekuly kapaliny přitažlivosti molekul pevné látky. Pokud je tato přitažlivost větší než povrchové napětí pevné látky, kapalina se rozteče a smáčí povrch, čímž tvoří předpoklad pro vznik adheze. Smáčivost je možné upravovat přidáním vhodných přídavných látek do lepicí směsi. Smáčivost je také velmi ovlivněna kvalitou povrchu. V případě dřeva se jedná o prach, mastnotu nebo u některých druhů dřevin vysoký obsah pryskyřic (David a Kratochvíl, 1986).

Koheze

Pevnost lepeného spoje je závislá také na vnitřní soudržnosti molekul lepidla po vytvrzení. Tato soudržnost se nazývá koheze. Síla koheze závisí převážně na struktuře a velikosti makromolekul lepicí směsi. Koheze je významná vlastnost lepicí směsi, která má vliv na rozpustnost, mísitelnost a výslednou pevnost lepidla. Míru koheze udává kohezní energie, která vyjadřuje energii potřebnou k odtrhnutí

jedné částice od ostatních. Soudržnost se mění v závislosti na tloušťce použité vrstvy lepidla. Se vzrůstající tloušťkou se pevnost lepeného spoje u běžných lepidel snižuje. Proto je důležité dosáhnout co nejtěsnějšího spoje samotných lepených materiálů. Při lepení dřeva a materiálů na bázi dřeva by kohezní síly lepidla měly dosahovat vyšších hodnot, než kohezní síly lepeného materiálu. U správně lepeného spoje by mělo k porušení dojít ve dřevě, nikoli v lepidle (Uhlíř, 1997).

3.2.2 Složky lepidla

Lepicí směsi se skládají z několika složek, které ovlivňují výsledné vlastnosti. Jejich přidáním je možné změnit vlastnosti a upravit je pro danou potřebu. Základní složkou lepicí směsi je filmotvorná látka neboli pojivo. Jedná se o makromolekulární látky, které jsou ve fázi nanášení lepidla v kapalném stavu. Do kapalného stavu je pojivo přivedeno podle druhu lepidla zahřátím nad bod tání, rozpuštěním v organickém rozpouštědle nebo disperzí ve vodě. Filmotvorná látka je základní složkou, která ovlivňuje přilnavost k lepenému materiálu a soudržnost lepeného spoje.

Další složkou lepicí směsi jsou plnidla a nastavovadla. Plnidla jsou pevné látky ve formě jemného prášku, které nemají vlastní lepivost. Používají se minerální plnidla jako sádrovec, mastek, kaolín, křída apod. Nastavovadla oproti plnidlům mají mírnou lepivost. Používají se bobtnavé organické látky, např. škroby a dřevěná moučka. Důvody přidávání plnidel a nastavovadel jsou ekonomické a technologické. Přidáním levné hmoty do pojiva se při malé změně vlastností redukuje cena dražších pojiv zvýšením objemu. Plnidla a nastavovadla regulují viskozitu lepicích směsí a zabraňují nadměrnému smáčení dřeva hlavně při lisování za vysoké teploty. Zvýšením viskozity se zabraňuje prosakování lepidla skrze póry dřeva při dýchování. Důležité je nepřekročit hranici, kdy podíl nastavovadel a plnidel výrazně snižuje výslednou pevnost spoje. Pro zvětšení objemu se používají v některých případech zpěňovadla. Lepicí směs se po přidání zpěňovadel šlehá a je tímto způsobem možné zvýšit objem lepidla až na pětinasobek. Takto zpěněná lepidla mají kromě většího objemu i menší tekutost, lépe se nanášejí a méně se vsakují do dřeva. K vytvrzení ve spoji by nemělo dojít ve zpěněném stavu, protože porézní film lepidla nevytváří dostatečně pevný spoj. Plnidla

a nastavovadla v některých případech mohou negativně ovlivňovat lepený spoj, např. snížením odolnosti vůči působení vlhkosti. Minerální látky přispívají k rychlejšímu otupování obráběcích nástrojů.

Často využívanou přísadou do lepicích směsí je tvrdidlo, které působí na lepidlo v tekutém stavu a způsobuje nebo zrychluje vytvrzení lepidla do tuhého stavu. Používá se u všech dvousložkových lepidel a u lepidel, které vytvrzují chemickou reakcí. Při přípravě lepicích směsí určených pro lepení za zvýšené teploty je snaha docílit krátké vytvrzovací doby za zvýšené teploty a zároveň dlouhé otevřené doby za studena. Z toho důvodu se přidávají do lepicí směsi retardéry, které oddalují tvrdnutí a zvyšují otevřenou dobu lepidla. Retardéry mají význam v situacích, kdy je z technologického důvodu potřeba udržet lepidlo co nejdéle v použitelném stavu, např. při výrobě lepených nosníků.

Další složkou lepidel jsou rozpouštědla, což jsou kapaliny nebo směsi kapalin, které se používají při výrobě na rozpuštění, popř. úpravu hustoty lepicí směsi. Před aplikací je možná úprava viskozity lepidla pomocí ředidel.

Vlastnosti lepicí směsi je možné upravit nejrůznějšími zušlechťujícími látkami. Upravuje se např. smáčivost lepidel, barva výsledného lepidlového filmu, mohou se přidat fungicidní látky apod. Do živočišných lepidel je možné přidat chlorované fenoly pro ochranu před biodegradací. Často se pomocí přídatných látek zvyšuje odolnost vůči působení vlhkosti, např. přidáním melaminu do močovinnových lepidel. Pro zvýšení doby skladovatelnosti je možné přidávat do lepicích směsí stabilizátory, které pomáhají zachovat specifické vlastnosti během delší doby skladování (Muzikář a kol., 2008, Trávník, 2003).

3.2.3 Vytvrzování lepidel

Charakteristickou vlastností lepidel je přechod z kapalného skupenství do skupenství tuhého s vysokou vnitřní soudržností. Vytvrzování lepeného spoje urychluje zpravidla působení tepla a tlaku. Procesy, které způsobují tuhnutí, mohou být různé. K vytvrzení nemusí docházet striktně jedním procesem, ale většinou probíhá jejich kombinací. Proces vytvrzování lepidla probíhá (Nemec a kol., 1986):

- unikáním disperzního prostředí,
- ochlazováním lepidla,
- chemickou reakcí,
- solvatací.

Nejběžnějším procesem tuhnutí je pohlcení disperzního prostředí nebo rozpouštědla lepeným materiálem. Tímto způsobem dochází ke spojování dispergovaných částic lepidla na souvislý film. V tomto případě je důležité, aby alespoň jeden spojovaný materiál byl porézní (např. dřevo).

Vytvrzování kontaktních lepidel spočívá v nánosu lepidla na obě slepované plochy a odpařením rozpouštědla z lepidla. Po odpaření jsou k sobě obě plochy přiloženy a stlačeny. Tlakem se odstraní vzduch ze spáry, molekuly lepidla se k sobě natlačí a dojde ke vzniku kohezních a adhezních sil.

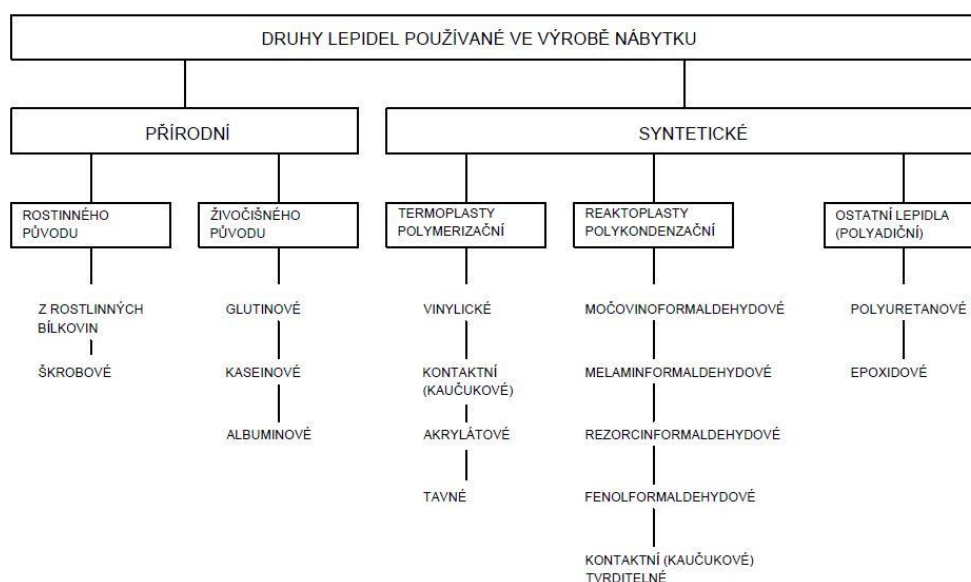
Dalším způsobem tuhnutí lepidla je proces ochlazování, který se používá u různých druhů tavných lepidel. Jelikož látky neobsahují rozpouštědla, není potřeba odvádět páry a k vytvrzení dochází ve velmi krátkém čase.

Jeden z nejrozšířenějších způsobů vytvrzování lepidla je chemickou reakcí. Polyadící nebo polykondenzací dochází k zesíťování molekul lepidla. V důsledku zesíťování narůstá molekulová hmotnost a vytváří se pevný trvalý spoj, který není ovlivnitelný působením zvýšených teplot. Lepidla tvrzená chemickou reakcí představují nejdůležitější skupinu novodobých lepidel.

Vlastnosti lepených spojů nejsou určeny pouze při procesu vytvrzování, ale jsou ovlivňovány působením vnějších vlivů, zejm. vlhkostí a teplotou. Ve spoji může docházet k vnitřnímu pnutí a tečení lepidla, jehož rozsah je dán reologickými vlastnostmi. Spojování dřeva sebou nese problém s jeho neustálými změnami tvaru působením měnící se vzdušné vlhkosti. Proto je požadavek určité pružnosti lepeného spoje (Eisner a kol., 1983; Nemeč a kol., 1986).

3.2.4 Rozdělení lepidel

Lepidla jako pomocný materiál při výrobě nábytku a materiálů na bázi dřeva plní důležitou funkci. Po chemické stránce tvoří velmi různorodou skupinu materiálů. Lepidla se dělí podle různých hledisek, ale žádné nevystihuje přesnou povahu jednotlivých typů. Rozdělují se např. podle původu na přírodní a syntetická. Přírodní lepidla byla postupem času vytlačena syntetickými kvůli nedostačujícím vlastnostem. V nábytkářském průmyslu se používá třídění lepidel podle původu, který vystihuje jejich charakter a určuje rámcové využití a zpracování (Drápela a kol., 1980).



Obrázek 18 Druhy lepidel používaných ve výrobě nábytku (podle Nemeč a kol., 1986).

Reaktoplastická lepidla, také nazývaná termoreaktivní, vytvrzují nejčastěji za působení tepla. Zahřátím dojde většinou za spolupůsobení katalyzátorů k chemickým reakcím, při kterých vzniká makromolekulární látka, která molekuly prostorově sváže. Dochází k zesíťování molekul. Po vytvrzení nedochází ani za působení tepla k měknutí spoje, lepidlo je nerozpustné a netavitelné.

Termoplastická lepidla se v nábytkářském průmyslu dělí také na disperzní, roztoková a tavná. Působením tepla při vytvrzování u termoplastických lepidel nedochází k chemické reakci, ale dochází pouze ke změně fyzikálních vlastností. Působením tepla na již vytvrzený spoj dochází k jeho měknutí a snížení pevnosti. Po ochlazení lepidlo opět tuhne (Drápela a kol., 1980).

3.2.5 Použití lepidel v dřevozpracujícím průmyslu

Lepidla v procesech výroby nábytku, a s nimi spojených materiálech, hrají významnou roli. Používají se na výrobu DTD, DVD, OSB desek, na výrobu laťovek, spárovek, překližek apod. Lepidla jsou využívána pro dekorační účely dýchování a nalepování dekoračních fólií a laminátů na velkoplošné materiály. Dílce z velkoplošných materiálů mají oproti dřevu nevzhledné hrany a je nutné je na viditelných místech olepit vhodným materiálem. Celá nábytkářská výroba je v těchto případech závislá na lepidlech. Nejvíce používaná lepidla jsou formaldehydová, která se uplatňují především na výrobu velkoplošných materiálů, dále PVAc lepidla, která se nejvíce využívají při výrobě spárovek a v montážním lepení. Velké zastoupení v montážním lepení i výrobě velkoplošných materiálů mají lepidla polyuretanová (Muzikář a kol., 2008).

Montážní lepení představuje poslední fázi výroby nábytku. Jde především o spojení dílců a konstrukčních prvků do poloh finálního výrobku. Při výběru lepidel je nutné uvažovat s podmínkami, ve kterých bude konstrukce používána. Dalším hlediskem je typ namáhání, které bude na konstrukci během užívání působit. Zásady pro výběr montážního lepidla jsou tuhost a pevnost spoje, které je dosaženo v co nejkratším čase, jednoduchost na přípravu a v neposlední řadě nízká cena.

Nejpoužívanějším montážním lepidlem je disperzní PVAc lepidlo, které vyniká svojí nenáročností na přípravu, rychlé vytvrzování a zdravotní nezávadnost. Výhodou je i snadné odstranění přebytečného lepidla. Nevýhodou je termoplastický charakter, který způsobuje měknutí spoje působením tepla a horší odolnost vůči vlhkosti. V dnešní době je však možné použití PVAc lepidel s třídou odolnosti proti působení vlhkosti D4. Pro rychlejší dosažení manipulační pevnosti se mohou používat PVAc lepidla v kombinaci s tavnými. Tavným lepidlem se vytvoří okamžitá manipulační pevnost ve výrobě a PVAc lepidlo zaručí konečnou pevnost spoje. Dalším používaným lepidlem v montáži nábytku je lepidlo polyuretanové. Výhodou jsou pevné a pružné spoje a výborná odolnost proti působení vlhkosti. PUR lepidlo se využívá na lepené spoje do exteriéru. Tvrdně vypěněním po kontaktu s vlhkostí a dokáže tak vyplnit případné drobné nerovnosti v kontaktu materiálů (Trávník a Svoboda, 2007; Drápela a kol., 1980).

3.2.5.1 PVAc lepidlo

PVAc lepidla jsou disperzní syntetická lepidla na bázi polyvinylacetátu. Pod pojmem disperze jsou označovány heterogenní systémy dvou a více složek, ve kterých jsou částice jedné nebo více složek rozptýleny – dispergovány – v jiné látce – disperzním prostředí. V případě PVAc lepidel je disperzním prostředím voda. Dispergované částice jsou makromolekulární látky získané polymerací ve vodě nerozpustných monomerů.

Vlastnosti lepidla jsou ovlivněny polymeračním stupněm a velikostí dispergovaných částic, které jsou zastoupeny nejčastěji v rozmezí 0,1 – 0,5 μm . Jemné částice difundují spolu s disperzním prostředím do podkladu, čímž dochází k dostatečnému zakotvení filmu lepidla. Střední a větší částice se podílí na vytvoření dostatečné kohezní síly. Při vytvrzování se částice k sobě přibližují, až dojde k jejich vzájemnému prolnutí. Podmínkou je, aby alespoň jeden lepený materiál byl porézní a umožnil difundaci disperzního prostředí (Eisner a kol., 1983).

PVAc lepidla jsou nejčastěji jednosložková, které vytvrzují výše popsaným principem. Mohou také vytvrzovat částečně fyzikálně a částečně chemicky přidáním tvrdidla. Potom se jedná o dvousložkové PVAc lepidla, která mají většinou větší odolnost vůči povětrnostním vlivům.

Obsah sušiny lepidla se většinou pohybuje kolem 50 %, ale v závislosti na účelu se může měnit. Čím větší obsah sušiny obsahuje lepidlo, tím rychleji po aplikaci schne a vytvrzuje. Vlastnosti lepidla je možné ovlivňovat jak složením základní disperze, tak různými přísadami. Vhodná plniva upravují vlastnosti, snižují náklady a jsou-li použita ve vhodném množství, nezhoršují kvalitu spojů. Při dlouhodobém skladování a v průběhu stárnutí lepených spojů odštěpují disperzní PVAc lepidla kyselinu octovou. Plniva uvolňované stopy kyseliny neutralizují (Muzikář a kol., 2008).

Zvláště vhodná jsou disperzní PVAc lepidla pro montážní lepení, protože po vytvrzení vytváří transparentní film. Jedná se převážně o jednosložková lepidla mléčné barvy, které je možné podle potřeby ředit vodou. Při aplikaci je potřeba dodržet minimální filmotvornou teplotu, která se pohybuje kolem 12°C, ale je možné ji snížit vhodnými přídatnými látkami (Eisner a kol., 1983).

3.2.5.2 PUR lepidlo

Polyuretanové (PUR) hmoty vznikají adiční polymerací vícesytných alkoholů, popř. polyesterových pryskyřic s izokyanáty. Smísením potřebných složek dochází k zesíťování molekul v lepicí směsi. Podle obsahu jednotlivých složek je možné silně ovlivňovat výsledné mechanické vlastnosti a zpracovatelnost lepidla. Výsledný spoj může být pružný a elastický až velmi tvrdý a pevný podle potřeby materiálu.

Polyuretanová lepidla jsou vyráběna jako dvousložková nebo jednosložková. U dvousložkových lepidel dochází k zesíťování smísením obou složek. Pro použití v dřevařském průmyslu, zejména při montážním lepení, se více využívají jednosložková lepidla, která se dají déle skladovat a jejich použití je jednodušší. V jednosložkovém polyuretanovém lepidle zůstávají nezreagované izokyanátové skupiny, které jsou citlivé na vodu. Působením vzdušné vlhkosti nebo vlhkosti v materiálu dojde k rozkladu izokyanátové skupiny a molekuly se zasíťují za současného vypěnění lepidla (Eisner a kol., 1983).

Výhoda polyuretanových lepidel spočívá v dobré adhezi k široké škále materiálů. Spoje mají dobré mechanické vlastnosti a dobrou odolnost proti povětrnostním vlivům, rozpouštědlům apod. K vytvrzování může docházet i za snížené teploty od 0°C (Trávník a Svoboda, 2007).

3.2.6 Technologické faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje

Viskozita neboli vazkost, lze vysvětlit třením jednotlivých molekul kapaliny o sebe. Vysoká viskozita (hustá konzistence) způsobuje špatné smáčení povrchu a obtížnější nanášení. Příliš nízká viskozita způsobuje naopak přílišné smáčení povrchu a lepená spára neobsahuje dostatek lepidla na vytvoření kvalitního spoje. S viskozitou a smáčením souvisí obecně savost lepených materiálů (David a Kratochvíl, 1986).

Další faktor ovlivňující kvalitu je lisovací tlak, který zabezpečuje adekvátní přiblížení lepených ploch k sobě a zabezpečuje vznik dostatečných adhezních a kohezních sil. Doporučené tlaky jsou vždy uvedeny v technickém listě lepidla. Lisovací tlak je také určen spojovaným materiálem, např. druhem dřeviny (Muzikář a kol., 2008).

Zvláště při lepení velkoplošných materiálů je důležitý parametr teplota. Ve výrobě se rozlišuje lepení za studena (teplota v rozmezí 15 – 25 °C), za tepla (teplota v rozmezí 30 – 100 °C) a za zvýšené teploty (teplota nad 100 °C). Vlivem teploty a použitím adekvátního lepidla je možné výrazně zkrátit lisovací časy a zrychlit výrobu.

Výše zmíněný lisovací čas je další faktor ovlivňující lepený spoj. Jedná se o čas od začátku působení tlaku až po jeho uvolnění. Při lisování za tepla nebo za zvýšené teploty je čas rozdělen na přechod tepla z lisovacího zařízení do lepené spáry a na požadovanou dobu lisování, při které dochází k vytvrzení lepicí směsi (Drápela a kol., 1980).

Konstrukce spoje by měla být konstruována tak, aby byl lepený spoj zatěžován převážně smykovým napětím a v minimální míře odlupováním, krutem apod. Zvýšení pevnosti a tuhosti spoje se dosáhne maximalizováním lepené plochy. Rovněž by měl být lepený povrch dostatečně čistý, bez mastnot, prachu a jiných nečistot (Eisner a kol., 1983).

V této práci byl zkoumán vliv vybraných faktorů na elastickou tuhost spoje. Mimo jiné se vyhodnocovala i hustota celého spoje a šířka letokruhů. Následující část této práce bude proto věnována obecné charakteristice dřeva a jeho vlastnostem.

3.3 Stavba a vlastnosti dřeva

3.3.1 Buk lesní

Buk lesní (*Fagus silvatica* L.) je jedna z našich nejvýznamnějších hospodářských listnatých dřevin. Letokruhy jsou poměrně dobře viditelné. Buk je charakteristický přítomností vyzrálého dřeva. U starších stromů se vyskytuje nepravé jádro.

Bukové dřevo je řazeno do skupiny dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou, je těžké a tvrdé. Barva dřeva je světlá až naružovělá, pařením získává hnědočervený odstín. V exteriéru dosahuje neimpregnované bukové dřevo malé životnosti. V suchu a ve vodě je naopak velmi trvanlivé.



Obrázek 19 Buk, příčný řez (Zeidler, 2012).



Obrázek 20 Buk, radiální řez (Zeidler, 2012).



Obrázek 21 Buk, tangenciální řez (Zeidler, 2012).

Dřevo je rovnolákenné s nevýraznou kresbou. Charakteristickým znakem jsou dřevné paprsky, které jsou dobře viditelné na všech řezech. Na tangenciálním řezu tvoří vřetenovité, několik mm dlouhé proužky, na radiálním řezu vytvářejí zrcátka.

Bukové dřevo má ze všech listnatých dřevin nejširší upotřebení. Používá se na výrobu pražců, parketových vlysů, dětských hraček, násad, buničiny, strojů, paliva apod. Široké využití nachází bukové dřevo ve výrobě nábytku. Používá se na výrobu ohýbaného nábytku, překližek, dých i jako masivní materiál (Lysý a Jírů, 1954; Novák, 1970; Zeidler, 2012).

3.3.2 Fyzikální vlastnosti dřeva

Na rohových spojích se kromě testování vlivu vybraných faktorů na elastickou tuhost zkoumala závislost mezi hustotou dřeva a šířkou letokruhů. Tyto dvě vlastnosti dřeva spolu s vlhkostí jsou popsány níže.

Vlhkost

Vlhkost dřeva označuje množství vody nacházející se ve dřevě. Vlhkost má podstatný vliv na změnu hustoty, rozměrů, odolnosti proti biotickým činitelům a dalších fyzikálních a mechanických vlastností. Rozlišuje se vlhkost absolutní a relativní. Vlhkost absolutní je vyjádřena podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu. Používá se při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností. Vlhkost relativní je vyjádřena podílem hmotnosti vody ke hmotnosti mokrého dřeva (Gandelová a kol., 2009).

Vodu lze rozdělit z hlediska uložení ve dřevě na vodu volnou (kapilární), vodu vázanou (hygroskopickou) a vodu chemicky vázanou (Horáček, 2008).

- a) Chemicky vázaná voda je součástí chemických sloučenin. Představuje 1 – 2 % sušiny dřeva a odstranit lze jen spálením. Při charakteristice mechanických a fyzikálních vlastností nemá význam.
- b) Voda vázaná (hygroskopická) se vyskytuje v buněčných stěnách a je vázána vodíkovými můstky na OH skupiny amorfní části celulózy a hemicelulóz. Ve dřevě se vyskytuje při vlhkostech v průměru 0 – 30 %. Pokud se mění vlhkost dřeva v rozsahu vody vázané, dřevo podléhá rozměrovým změnám. Při charakteristice mechanických a fyzikálních vlastností má největší vliv.
- c) Voda volná (kapilární) vyplňuje lumeny buněk a mezibuněčné prostory. Při charakteristice mechanických a fyzikálních vlastností má podstatně menší roli než voda vázaná.

Hustota

Hustota je fyzikální vlastnost dřeva, která je charakterizována jako podíl hmotnosti dřeva a jeho objemu. Hodnota hustoty je vzhledem k hygroskopicitě dřeva velmi ovlivněna vlhkostí. Se zvyšující se vlhkostí se zvyšuje hmotnost dřeva až do maximálního nasycení. Objem se oproti hmotnosti zvyšuje pouze do meze

hygroskopicity. Hustota je z tohoto důvodu velmi proměnná. I přesto se jedná o jednu z nejvýznamnějších charakteristik, která má vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva (Horáček, 2008).

Závislost mezi hustotou a mechanickými vlastnostmi je kromě vlhkosti ovlivněna řadou dalších faktorů, např. množstvím dřevní hmoty v jednotkovém objemu dřeva, stavbou dřeva, šířkou letokruhů, dřevinou nebo polohou v kmeni. Hustota bukového dřeva vzrůstá s rostoucí vzdáleností od středu kmene po určitou mez, od které směrem k obvodu opět klesá. Vztah mezi hustotou a mechanickými vlastnostmi nemusí být vždy významný. Např. tlaková pevnost bukového dřeva podél vláken se se změnou hustoty příliš neliší (Požgaj a kol., 1997).

Šířka letokruhů

Letokruh je tloušťkový přírůst dřeva, který se vytvoří ve vegetačním období roku činností dělivých buněk kambia. Přírůstek tvoří jarní a letní dřevo, které se tvoří postupně během vegetačního období. Rozdílnost jarního a letního dřeva je v odlišné anatomické struktuře a rozdílné hustotě. Letní dřevo má vyšší hustotu než dřevo jarní, z čehož vyplývá vliv podílu letního dřeva na hustotě dřeva. Podle odlišnosti struktury jarního a letního dřeva lze naše dřeviny rozdělit na: dřevo jehličnatých dřevin, dřevo listnatých dřevin s polokruhovitě pórovitou stavbou, dřevo listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou a dřevo listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou (Gandelová a kol., 2009).

Dřevo jehličnanů a kruhovitě pórovitých listnáčů vykazuje výrazné rozdíly mezi jarním a letním dřevem v barvě, resp. struktuře. Roztroušeně pórovité dřeviny, kam spadá i buk, mají z dřevin mírného pásma nejméně výrazné letokruhy, které jsou někdy jen zvýrazněné velmi úzkou tmavší vrstvou na jejich hranici. Přechod mezi jarním a letním dřevem je velmi plynulý a dřevo vykazuje nejvyšší míru homogenity.

Šířka letokruhů je závislá na dřevině a růstových podmínkách a má významný vliv na vlastnosti pouze u dřevin, kde je zřetelný rozdíl mezi jarním a letním dřevem (jehličnany, kruhovitě pórovité listnaté dřeviny). Zatímco u jehličnatých dřevin se hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností snižují s rostoucí šířkou letokruhů, u kruhovitě pórovitých dřevin je tato tendence opačná.

Dřeviny s roztroušeně pórovitou stavbou nevykazují jednoznačnou a výraznou závislost (Požgaj a kol., 1997).

Kromě výše uvedené hustoty, šířky letokruhů a vlhkosti ovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva řada dalších faktorů. Význam má druh a stavba dřeva, vady vzniklé za života stromu, teplota, rozměry a geometrie.

3.3.3 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanické vlastnosti dřeva vyjadřují schopnost dřeva odolávat působení vnějších sil. Stejně jako fyzikální vlastnosti i mechanické mají anizotropní charakter. Anizotropie je dána uspořádáním molekul ve dřevě a jejich orientací. Rozdíl vlastností je nejvýraznější mezi podélným a příčným směrem. Tento fakt je způsoben tvarem a uspořádáním základních elementů dřeva, směrem fibril v sekundární buněčné stěně, vazbami aj. Při namáhání v podélném směru se více zatěžují pevnější kovalentní vazby, zatímco při namáhání kolmo na vlákna se zatěžují více vazby vodíkové (Požgaj a kol., 1997).

Napětí a deformace

Napětí představuje míru vnitřních sil, které vznikají ve dřevě v důsledku vnějších mechanických sil. Pokud síla působí kolmo na plochu, způsobuje normálové napětí (tlak, tah, ohyb). Působením v rovině průřezu vzniká tangenciální napětí (smyk, krut). Interakcí mechanických sil a odporem dřeva vzniká ve dřevě určitý stav napjatosti, který je definován počtem, druhem, průběhem napětí a jejich vzájemnými vztahy. Stav napjatosti může být jednoosý, dvouosý nebo víceosý v závislosti na počtu hlavních napětí (Gandelová a kol., 2009).

Deformace je definována jako změna tvaru a rozměru dřeva v důsledku působení mechanických sil. Kromě mechanických napětí je dřevo namáhané napětím vlhkostním. Jelikož dřevo je hygroskopický materiál, mění v závislosti na okolním prostředí svou rovnovážnou vlhkost. Se změnou vlhkosti mění dřevo svůj tvar – deformuje se. Ukládáním vody do buněčných stěn dřevních vláken vzniká napětí, které způsobuje pružné deformace. Vlhkostní napětí je nutné zohledňovat např. v konstrukcích (Požgaj a kol., 1997).

Kvalitativně jde rozdělit deformace na:

- deformace pružné ε_p ,
- deformace pružné v čase $\varepsilon_{p\check{c}}$,
- deformace plastické ε_{pl} .

Působením mechanických sil se těleso deformuje. Deformace jsou součtem všech výše uvedených druhů. Pružná deformace je vratná změna rozměrů. Po ukončení působení vnějších sil se dřevo okamžitě vrací do svého původního tvaru. Je-li dřevo namáháno pouze takovým napětím, že vznikají pouze pružné deformace, nachází se v pružné oblasti stavu napjatosti.

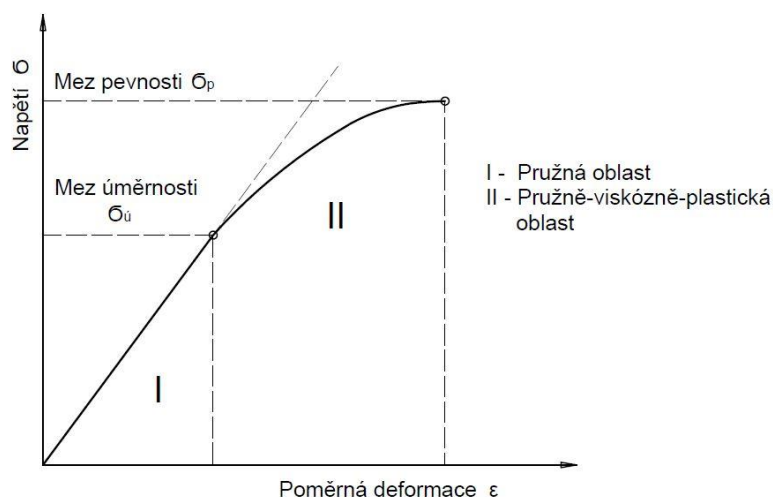
Deformace pružná v čase vzniká ve dřevě působením napětí delší dobu. Po ukončení působení vnějších sil se dřevo vrací do původního tvaru až za nějaký čas. Je-li dřevo deformováno pružně a pružně v čase, nachází se v pružně-viskózní oblasti stavu napjatosti.

Deformace plastická je nevratná trvalá změna původního tvaru a rozměrů. Po ukončení působení vnějších sil se dřevo nevrátí do původního tvaru, ale získává jiné rozměry. Plastickým deformacím vždy předchází deformace pružné, popř. i deformace pružné v čase. V takovém případě se dřevo nachází v pružně-viskózně-plastické oblasti stavu napjatosti.

Vztahem mezi deformací a napětím se zabýval Robert Hooke, po kterém je pojmenován zákon, který říká, že do určité hranice zatížení je deformace úměrná působícímu napětí (Gandelová a kol., 2009).

Pracovní diagram

Pracovním diagramem se nazývá empirická křivka, která charakterizuje vztah mezi napětím a deformací. Obecný tvar pracovního diagramu pro dřevo je znázorněn na obrázku 22.



Obrázek 22 Obecný tvar pracovního diagramu (podle Požgaj a kol., 1997).

Pracovní diagram lze rozdělit na dvě části. První, lineární část křivky po mez úměrnosti a nelineární část ohraničenou mezí úměrnosti a mezí pevnosti. Mez úměrnosti je možné definovat jako nejvyšší napětí, při kterém ve dřevě nevznikají plastické deformace. Vznikají pouze pružné deformace, popř. deformace pružné v čase a napětí je rovnoměrně rozděleno v celém tělese. Dřevo se nachází v pružné oblasti stavu napjatosti (Gandelová a kol., 2009). Ze submikroskopického hlediska se v pružné oblasti namáhají vodíkové vazby mezi polysacharidovými řetězci. Výsledkem je lámání a deformace vazeb, které se následně přeskupí. Sousední mikrofibrily se po sobě smýkají. Pevnější kovalentní vazby C – C a C – O se deformují v rámci benzenového jádra, ale nedochází k jejich porušení. K deformacím pružným v čase dochází deformováním jader makromolekul, vyskytujících se v amorfní oblasti celulózy, popř. hemicelulózy (Požgaj a kol., 1997).

Druhá část diagramu je charakteristická odklonem křivky od lineární části. Zvýšením napětí nad mez úměrnosti vznikají kromě deformací pružných a pružných v čase také nevratné deformace plastické. Napětí ve dřevě již není rozloženo rovnoměrně a dřevo se nachází v pružně-viskózně-plastické oblasti stavu napjatosti. Plastické deformace se na submikroskopické úrovni projevují nejen porušením vodíkových vazeb, ale i pevnějších kovalentních vazeb C – C a C – O. Zlomy ve vazbách jsou již nevratné a dochází ke změně tvaru.

Vzniklé plastické deformace již nejsou přímo úměrné napětí a nemizí po ukončení působení vnějších sil. Velikost napětí, které je potřebné k fatálnímu

porušení dřeva, je označováno jako mez pevnosti. Tu lze charakterizovat jako maximální napětí, při kterém si dřevo zachovává svou celistvost (Požgaj a kol., 1997).

3.3.3.1 Pružnost

Pružnost se definuje jako schopnost dosáhnout původních rozměrů po uvolnění vnějších sil. Změny ve vzdálenosti mezi atomy jsou návratné a po uvolnění vnějších sil se atomy vrací na vzdálenost, při které dosahují nejnižší potenciální energii. Pružně se dřevo chová až do dosažení meze úměrnosti. Zvětšováním napětí v materiálu vznikají trvalé deformace (Požgaj a kol., 1997).

V lineární části diagramu napětí – deformace kvantifikují pružnost dřeva čtyři charakteristiky (Požgaj a kol., 1997):

- moduly pružnosti E , G ,
- Poissonova čísla μ ,
- mez úměrnosti σ_u ,
- energie pružné deformace W_p .

Modul pružnosti

Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor proti pružné deformaci materiálu. Uvažuje se modul pružnosti E (také označován jako Youngův modul pružnosti) při normálovém namáhání (tah, tlak, ohyb) a modul pružnosti G při tangenciálním namáhání (smyk, krut). Při víceosém namáhání se uvažuje objemový modul pružnosti E_k (Požgaj a kol., 1997). Čím větší je hodnota modulu pružnosti, tím větší napětí je potřebné k vyvolání deformace, dřevo je tužší a méně poddajné. Moduly pružnosti vyjadřují míru tuhosti dřeva (Novák, 1970).

Základní vztah pro modul pružnosti v tahu a tlaku lze charakterizovat jako podíl mezi napětím a poměrnou deformací.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}; G = \frac{d\tau}{d\gamma} \quad [MPa]$$

Hodnoty modulu pružnosti pro hospodářsky významné dřeviny se pohybují mezi $E = 7\,000 - 15\,000$ MPa a $G = 100 - 2\,000$ MPa při absolutní vlhkosti dřeva 12 %. Napříč vláken dosahuje modul pružnosti E zhruba 25x menších hodnot než

ve směru vláken. Velikosti modulů pružnosti jsou základní charakteristiky dřeva a získávají se experimentálně na zkušebních tělesech (Gandelová a kol., 2009).

Poissonova čísla

Působením síly ve dřevě vznikají deformace jak ve směru síly, tak ve směru kolmém na směr síly, které se označují jako příčné deformace. Působením tlaku vznikají kladné příčné deformace (materiál se rozšiřuje), působením tahu vznikají záporné příčné deformace (materiál se zužuje). Poissonova čísla, označované také jako koeficienty příčné deformace, vyjadřují podíl poměrné příčné deformace k poměrné podélné deformaci (Požgaj a kol., 1997). Využívají se především při objemových změnách dřeva způsobených mechanickým zatížením. U izotropních látek mohou dosahovat Poissonova čísla maximální hodnoty 0,5. Vyšší Poissonova čísla u dřeva dokazují jeho anizotropní charakter (Gandelová a kol., 2009).

3.3.3.2 Pevnost

Pevnost dřeva je charakterizován jako odpor, nebo odolnost dřeva proti jeho trvalému porušení. Vyjadřuje se maximálním napětím, při kterém dojde k porušení celistvosti dřeva, tedy napětím na mezi pevnosti. Podle fyzikální povahy veličin definujících pevnost se rozlišují tři druhy pevnosti (Požgaj a kol., 1997):

- smluvní (konvenční) pevnost,
- skutečná pevnost,
- ideální (teoretická) pevnost.

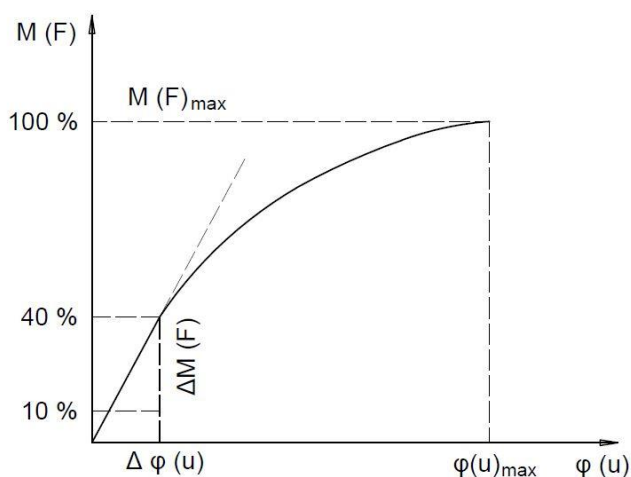
Konvenční pevnost se vyjadřuje jako největší napětí vztáhnuté k průřezu tělesa. U dřeva tato pevnost není brána v úvahu. Ideální pevnost jde teoreticky spočítat pro každý materiál z meziatomových vazebních sil. Jelikož dřevo je organický nehomogenní materiál, je téměř nereálné vypočítat ideální (teoretickou) pevnost touto cestou. U dřeva se bere v úvahu pevnost skutečná, definovaná skutečným napětím působícím v okamžiku porušení tělesa na mezi pevnosti. Výjimku představuje pevnost dřeva ve směru napříč vláken, která se definuje jako konvenční. V tomto případě se nedosáhne konečného porušení dřeva.

Pevnost dřeva lze rozdělit podle (Gandelová a kol., 2009):

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

3.3.3.3 Tuhost

Pevnostní vlastnosti spoje je možné přehledně znázornit na jejich pracovním diagramu, kde jsou charakterizovány silou a posunutím, popř. momentem a pootočením. Na obrázku 23 používá Joščák (1999) interval mezi 10 a 40 % z maximální zatěžovací síly. Hodnoty síly a posunutí, popř. momentu a pootočení používá pro výpočet koeficientu poddajnosti a koeficientu tuhosti.



Obrázek 23 Modelový pracovní diagram. $M(F)_{max}$ – moment (síla) při porušení spoje, $\varphi(u)_{max}$ – úhlová deformace (posunutí ramen) spoje při $M(F)_{max}$ (podle Joščák, 1999).

Koeficienty poddajnosti (z) a tuhosti (t) vyjadřují deformovatelnost spoje vlivem působící síly nebo ohybovým momentem a jsou navzájem převrácenou hodnotou. Jedná se v podstatě o modul posunutí, který udává velikost síly potřebné k vyvolání jednotkového posunu, nebo o torzní tuhost poddajného spoje, která je definovaná jako moment způsobující ve spoji pootočení o 1 rad.

$$z = \frac{\Delta u (\Delta \varphi)}{\Delta F (\Delta M)} ; \quad t = \frac{1}{z} = \frac{\Delta F (\Delta M)}{\Delta u (\Delta \varphi)}$$

Kde:

ΔF je rozdíl síly při 10 a 40 % maximálního zatížení,

ΔM je rozdíl momentu při 10 a 40 % maximálního zatížení,

Δu je posunutí ramen spoje mezi 10 a 40 % maximálního zatížení,

$\Delta \varphi$ je úhlová deformace spoje mezi 10 a 40 % maximálního zatížení.

V této práci je zaveden pojem elastická tuhost, která je výpočtem a významem ekvivalentní k uváděnému koeficientu tuhosti. V pracích pojednávajících o nábytkových spojích různých tvarů a konstrukcí autoři používají termíny koeficient tuhosti i elastická tuhost. Zahraniční autoři využívají spíše termín koeficient tuhosti – viz Jivkov et al. (2008), Kamperidou et al. (2012) nebo Smardzewski et al. (2014). Termín elastická tuhost je možné najít ve výzkumech např. Záborský a kol. (2017) nebo Podlena a Borůvka (2016).

Elastická tuhost vztažená k celé konstrukci (tuhost konstrukce) je definována jako schopnost konstrukce nábytku eliminovat účinky působících sil při jeho užívání. Udává, jak velké budou účinky zatížení. Vyjadřuje se hodnotami sil nebo momentů vyvozujících jednotkové hodnoty příslušných přetvoření (Joščák, 1999).

Součástí práce je simulovat na modelech rohových spojů deformaci a průběh napětí při zatěžování tlakem a tahem. Údaje ze simulace se porovnávají s experimentálně naměřenými daty. Simulace probíhala v programu SolidWorks využitím metody konečných prvků.

3.4 Počítačové simulace

Počítačové programy, které jsou schopny simulovat reálné podmínky ve virtuálním prostředí, byly vyvíjeny již od 60. let. Vývoj nejdříve probíhal výhradně na univerzitách v USA a Kanadě, dále pak ve Velké Británii a Francii. Postupem času se vývoj přesunul z univerzitního prostředí do soukromé sféry. Velké firmy byly schopny zajistit profesionální provedení, což znamenalo a dodnes znamená spolupráci odborníků z mnoha různých oborů. Zajišťují tedy finančně náročný vývoj, servis a potřebný marketing pro rozšíření programu (Poživil a kol., 1997).

Využitelnost počítačových programů obecně vždy souvisela s technickými možnostmi a výkoností výpočetní techniky. Platformy pro první simulační programy byly velké sálové počítače. Postupem času se přesunuly programy na osobní počítače, které v dnešní době disponují dostatečným hardwarovým vybavením. Zjednodušují tak práci a mobilitu vývojářů (Poživil a kol., 1997).

Díky pokroku v oblasti výpočetní technologie se počítače a specializované programy staly důležitým pomocníkem při práci napříč všemi obory. Ať už se jedná o programy na grafické zpracování výkresových dokumentací, vizualizaci nejrůznějších staveb nebo součástí ve strojírenství apod. Běžnou praxí jsou i programy, ve kterých se automaticky vypočítává např. statická pevnost celého modelu nebo je možné simulovat reálné podmínky ve virtuálním prostředí.

Podle způsobu a oblasti využití lze rozlišit tři skupiny simulačních programů (Poživil a kol., 1997):

1. Jednouúčelové simulační programy.

Jedná se o úzce specializované programy určené pro konkrétní proces nebo zařízení. Mají pevně stanovenou topologii a oproti ostatním skupinám programů vynikají rychlostí simulace.

2. Specializované simulační programy.

Charakterem jsou podobné univerzálním simulačním programům. Na rozdíl od nich se jedná o propracovanější programy, které jsou omezeny na užší okruh procesů nebo zařízení.

3. Univerzální simulační programy.

Tyto programy poskytují nejširší záběr simulací procesů. Jsou opakem jednoúčelových programů. Konkrétní simulace je nadefinována uživatelem. Tyto programy jsou určeny pro procesy s volitelnou topologií.

Programy, které poskytují na základě vstupních údajů všechny výstupy ve formě vnitřních sil, reakcí, deformací apod. jsou velmi oblíbené napříč obory. Velmi oblíbenou a efektivní metodou, kterou používá většina takovýchto programů je metoda konečných prvků (Kolář a kol., 1997).

3.4.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků je velmi rozšířená numerická metoda sloužící k řešení problémů soudobé statiky a dynamiky. Jedná se jednu z nejefektivnějších metod získání na základě vstupních údajů všechny výstupy. Český název metody konečných prvků (MKP) vychází z mezinárodně uznávané zkratky FEM (Finite Element Method).

„FEM je zobecněná Ritz-Galerkinova variační metoda, užívající báзовých funkcí s malým kompaktním nosičem, úzce spjatým se zvoleným rozdělením řešené oblasti na konečné prvky“ (Kolář a kol., 1997, s. 21).

Španiel a Horák (2011) uvádí definici metody konečných prvků jako způsob diskretizace kontinua, přičemž zkoumané těleso je rozděleno na podoblasti, ve kterých je interpolován posuv z hodnot v uzlových bodech. Součtem potenciálních energií v jednotlivých podoblastí je možné vyjádřit celkovou potenciální energii zkoumaného tělesa.

Za zakladatele metody konečných prvků je považován matematik Richard Courant. Ve své práci o problémech torze z roku 1943 představil matematický postup, který se stal základem metody konečných prvků. O další vývoj se zasadili převážně inženýři, kteří postup aplikovali při řešení úloh v technické praxi. Prvotní ideu o metodě konečných prvků měl však již v roce 1941 Hrenikoff, který řešil rozsáhlé rámové konstrukce pomocí rozložení spojitě oblasti na menší části (Lenert, 1999). Tuto metodu pojmenoval „metoda konečných prvků“ až v roce 1960

profesor R. W. Clough. Český název metoda konečných prvků (MKP) vznikla z anglického názvu *finite element method* (FEM), (Kazda, 1995).

V současné době je metoda konečných prvků používána v mnoha programech a s její pomocí se řeší problémy téměř ve všech odvětvích průmyslu. Uplatňuje se ve strojírenství, stavebnictví, leteckém a lodním průmyslu, energetice a dokonce i v biomechanice, kde řeší např. proudění krve, pevnosti kosti i různých implantátů. Vše bylo možné provádět až po roce 1970, který je považován za přelomový rok pro metodu konečných prvků. V tomto roce společnost Intel vyvinula první mikroprocesor (Lenert, 1999).

3.4.1.1 Podstata metody konečných prvků

Podstatou MKP je rozložení konstrukce na menší fiktivní části, nazývané konečné prvky. Analýza jednotlivých prvků je oproti celé soustavě poměrně jednoduchá záležitost. Pro rovinnou konstrukci se používá nejčastěji trojúhelníkový, čtyřúhelníkový nebo jiný tvar prvků. Pro trojrozměrnou konstrukci se vytváří čtyřstěnné, šestistěnné a jiné. Prvky jsou mezi sebou spojené ve vrcholech nebo na hranách a vytváří tak souvislou síť po celém modelu. Rozdělení konstrukce na síť prvků je v dnešní době generováno automaticky v příslušném počítačovém programu. Pro potřebnou interakci prvků v síti je potřeba definovat podmínky, které zajišťují rovnováhu a kompatibilitu konstrukce. Z těchto podmínek se poté vypočítají neznámé silové a deformační faktory (Lenert, 1999).

3.4.1.2 Postup řešení MKP

V metodě konečných prvků existuje dualita ve formulaci principu virtuální práce. Princip virtuálních posunutí vzniká obměnou energie systému podle deformace a složek posunutí. Zahrnuje v sobě podmínky rovnováhy, kterým je nadřazen. Nazývá se Lagrangeův. Druhý princip, označovaný jako Castiglianův, vzniká obměnou komplementární energie systému podle napětí a vnějších sil. Oproti Lagrangeovu principu je nadřazen podmínkám kompatibility (Lenert, 1999).

Celý postup metody konečných prvků je možné vyjádřit v několika krocích (Fusek a Halama, 2011):

1. Rozdělení řešené oblasti.

První krok metody konečných prvků spočívá v rozdělení řešené oblasti na menší části, které jsou nazývány elementy nebo konečné prvky. Chování jednotlivých prvků je možné poměrně jednoduše popsat.

2. Formulace chování jednotlivých elementů.

Matematickým popisem chování elementů bývá nejčastěji matice. Pro každý element se formuluje matice definující jeho chování. Odvození matic je základem celé analýzy metody konečných prvků.

3. Opětné složení a získání výsledné soustavy rovnic.

Dalším krokem je opětné složení jednotlivých konečných prvků do původního celku. Všechny matice popsané pro každý jeden element se sestaví do globálních matic popisujících chování celku.

4. Aplikace okrajových či počátečních podmínek.

Z výsledné soustavy rovnic je možné vypočítat odezvu celé soustavy.

5. Vlastní řešení systému rovnic.

V závěrečném kroku se získají primární neznámé celé soustavy. V případě jedné z nejpoužívanější deformační varianty MKP se jedná o posuvy.

6. Získání dodatečných (odvozených) výsledků.

Jedním z nejčastějších výstupů jsou průběh napětí v tělese a vzniklé deformace, které vznikají působením síly.

Metoda konečných prvků není naprosto přesná a ve výsledcích mohou vznikat chyby. Tyto chyby se rozdělují do dvou skupin (Fusek a Halama, 2011):

1. chyby modelu,
2. chyby metody.

Chyby modelu vznikají při modelaci a zadávání vstupních informací. Dělí se na chyby kvalitativní a kvantitativní. Ke kvalitativní chybě dochází, pokud model neobsahuje všechny důležité informace pro kvalitní řešení problému. Kvantitativní

chyba nastává, pokud model sice obsahuje všechny důležité vstupní informace, ale jejich vyjádření je pro řešení nedostatečné (Fusek a Halama, 2011).

Mezi chyby metody se řadí tzv. diskreditační chyba, která vzniká při nahrazování spojitě oblasti sítí konečných prvků (elementů). Přesnost záleží na tom, jakým počtem elementů a uzlů se nahradí zkoumaná oblast. Čím více elementů se použije, tím více se výsledek blíží spojitému řešení. Další, formulační, chyba souvisí s volbou aproximační funkce nad elementem, která popisuje jeho chování. Nejčastěji se používá aproximace lineární nebo kvadratická. Poslední chybou metody je chyba numerická, která souvisí s tím, jak pracuje počítač s reálnými čísly, např. zaokrouhlování. Se současnými technickými možnostmi a vyspělostí programů používající MKP je numerická chyba zanedbatelná (Fusek a Halama, 2011).

3.4.2 SolidWorks

Pro modelování a simulaci zatěžování testovaného spoje byl použitý program SolidWorks 2015. Jedná se o parametrický objemový i plošný modelář fungující na technologii jádra Parasolid. Program disponuje funkcemi pro strojírenství, návrhy plechových a plastových dílů, forem a svařenců. Podporuje také práci se sestavami s možností generování výkresové dokumentace. Díky plné asociativitě souborů se provedené změny v modelu automaticky promítnou do sestav a výkresů. Program SolidWorks podporuje on-line spolupráci více konstruktérů a dokáže komunikovat s ostatními CAD programy (Freibauer a kol., 2010).

Program SolidWorks je možné dovybavit doplňkovými moduly, které poskytují mnoho dalších nástrojů a rozšiřují tak funkčnost základního modelování. Využívané jsou ve strojírenství, mechanice, elektrotechnice, letectví, kosmonautice, dopravě, energetice, lékařství nebo stavitelství. Konstruktérům, technikům a designérům umožňují doplňkové moduly zkrátit vývojovou fázi výrobku, zvýšit kvalitu a snížit tím náklady na testování (Freibauer a kol., 2010).

Doplňkovým modulem, který byl použit pro simulaci napětí a deformace testovaného spoje je SolidWorks Simulation. Jedná se o modul provádějící pevnostní analýzu pomocí metody konečných prvků. Program automaticky

generuje síť konečných prvků na modelu a simuluje různé druhy zatížení (Freibauer a kol., 2010). Výhodou simulace je možnost testování vytvořeného modelu ve virtuálním prostředí s reálnými provozními podmínkami. Tím je možné odhalit slabá místa a navrhnout příslušná opatření ještě před tím, než produkt půjde do výroby (www.solidworks.cz).

Výpočet trvá podle složitosti analyzovaného modelu pár vteřin až desítky minut. Výsledky jsou v podobě nejmenšího nalezeného součinitele bezpečnosti, grafického znázornění kritických oblastí modelu, průběhu napětí na modelu s maximálním a minimálním napětím a průběhu deformace modelu s maximální a minimální deformací. Zobrazení průběhu napětí a deformace je možné animovat (Freibauer a kol., 2010).

4 Metodika

Cílem práce bylo na vybraném typu nábytkového spoje experimentálně ověřit elastickou tuhost. Pro výzkum byl zvolen prostorový rohový spoj na tupo s vlepenými kolíky. Testované vzorky představovaly spojení lubu se sloupkem, resp. nábytkovou nohou. Takové spojení se nejčastěji vyskytuje v nábytkářském průmyslu u stolového a židlového nábytku klasické konstrukce a u skeletového nábytku. Pro potřeby experimentu byly zkoumané vybrané faktory, ovlivňující výslednou elastickou tuhost spoje. Zkoumané faktory byly:

- průměr použitých spojovacích kolíků,
- typ namáhání,
- typ lepidla,
- úhel letokruhů.

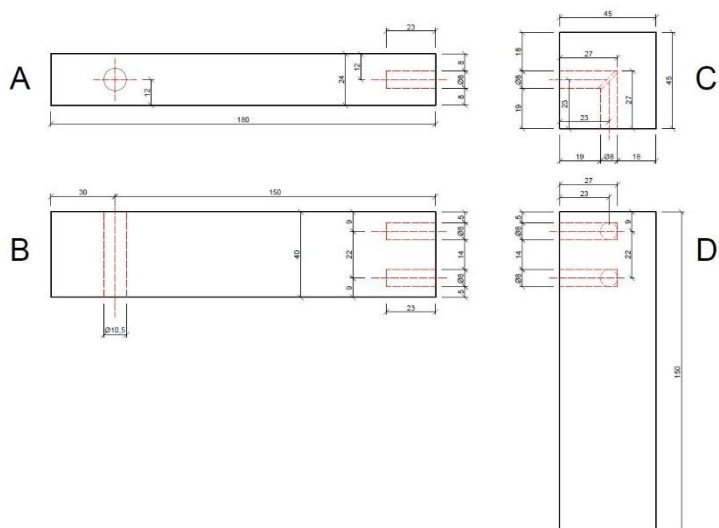
Každý zkoumaný faktor, kromě úhlu letokruhů, měl dvě varianty. Použity byly dva průměry spojovacích kolíků (8 a 12 mm), dva typy lepidla (PVAc a PUR) a dva typy namáhání (tlakové a tahové). Pro každou z osmi kombinací bylo připraveno a testováno 10 vzorků. Dále se zkoumala závislost hustoty na průměrné šířce letokruhů a korelace mezi elastickou tuhostí a tuhostí při maximálním zatížení.

Pro výpočet elastické tuhosti se použily hodnoty naměřené z oblasti pružné deformace. Tato oblast byla ohraničena 10 a 40 % z maximální zatěžovací síly. Jednotlivé zkušební vzorky se fixovaly do úchytů univerzálního testovacího stroje, čímž docházelo ke vzniku mírného napětí ještě před začátkem zkoušky. Napětí se projevovalo neplynulým průběhem začátku zkoušky. Z toho důvodu byla zvolena spodní hranice měřené oblasti 10 %, aby se neplynulý průběh ze začátku testu eliminoval. Horní hranice 40 % byla zvolena pro zajištění testování v oblasti působení pouze pružných deformací.

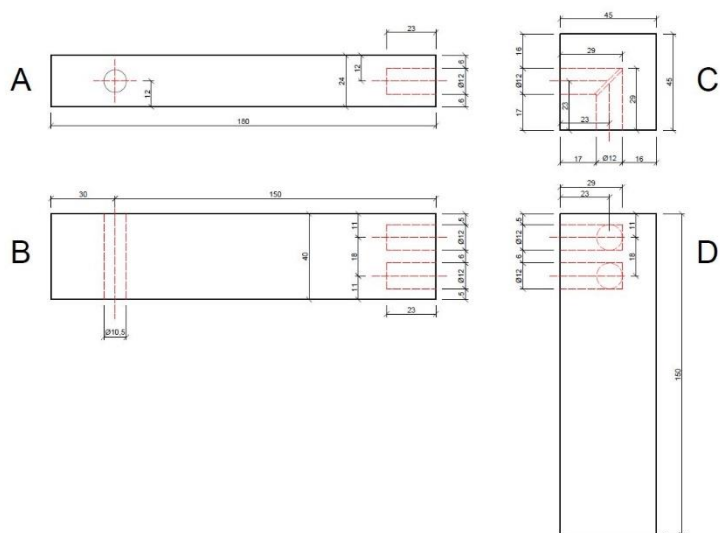
4.1 Příprava zkušebních vzorků

Na výrobu zkušebních vzorků bylo použito bukové dřevo (*Fagus sylvatica* L.) pocházející z Prešovského regionu (Slovensko). Po nařezání na fošny bylo řezivo v sušárně APT Line II (Binder, Německo) vysušeno na konečnou vlhkost 10 %, které odpovídá relativní vlhkost vzduchu 55% a teplota 20°C. Tato vlhkost dřeva

odpovídá vlhkosti dřeva pro vnitřní užití ve vytápěných budovách (ČSN EN 942). Po dosažení požadované vlhkosti byly z fošen vyrobeny dílce požadovaných rozměrů s konstrukčními otvory připravené k sestavení do testovaných těles. Tvar a rozměry vzorků zobrazují obrázky 24 a 25.



Obrázek 24 Geometrie rohového spoje s 8 mm kolíky.



Obrázek 7 Geometrie rohového spoje s 12 mm kolíky.

Zkušební vzorky byly sestaveny ze dvou lubů a jednoho sloupku. Spojovacím prvkem byly bukové kolíky opatřené na povrchu rýhováním. Použity byly dva různé průměry kolíků – 8 a 12 mm. Zvolené průměry odpovídaly tloušťkou jedné třetině, resp. jedné polovině tloušťky lubu. Pro zvětšení lepené

plochy mezi spojovacím kolíkem a konstrukčním otvorem byly konce kolíků zaříznuté na 45°. Mezi stykem zešikmených ploch byla ponechána technologická mezera 1-2 mm pro případný přebytek lepidla. Kolíkový spoj rozměrově do jisté míry imitoval spojení na čep a dlab, který představuje jeden z nejběžnějších způsobů spoje, ale je náročnější na výrobu a čas.

Sestavení jednotlivých dílců do zkušební vzorku probíhalo ve dvou etapách. První etapa přípravy spočívala v zalepení kolíků do lubů. Lepidlo se nanášelo v dostatečném množství podle doporučení v technickém listu a s ohledem na to, aby co nejméně lepidla bylo vytlačeno vně konstrukčního otvoru. Po vytvrnutí byly luby očištěny od případného zbytku lepidla a na formátovací pile byly kolíky zaříznuty pod úhlem 45°. Druhá etapa spočívala v sestavení dílců do výsledného zkušební vzorku. Ostré hrany zaříznutých kolíků byly zabroušeny, aby nedocházelo při sestavování ke stírání lepidla z vnitřní strany konstrukčního otvoru. Po nanesení lepidla se všechny dílce sestavily do finálního tvaru a spoje byly fixovány truhlářskými svorkami. Čas fixování se odvíjel od použitého lepidla podle technických listů. Spoje lepené PVAc lepidlem byly fixovány 30 minut a spoje lepené PUR lepidlem byly fixovány 60 minut. Při sestavování byla snaha o to, aby se lepidlo nedostávalo mimo konstrukční otvor na plochu styku lubu se sloupkem. Tím se dosáhlo zatěžování pouze spojovacího prostředku (kolíku) bez ovlivňování slepené stykové plochy.

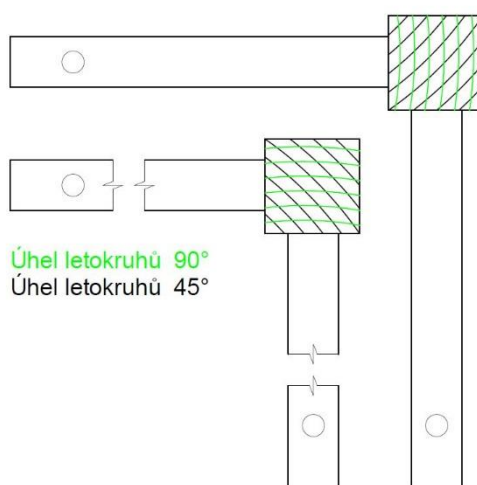
Pro lepení testovaných vzorků byly použity dva typy lepidel: jednosložkové PVAc lepidlo AG-COLL 8761 s třídou odolnosti vůči působení vlhkosti D3 a jednosložkové polyuretanové lepidlo NEOPUR 2238R. Základní technické údaje použitých lepidel jsou zobrazeny v tabulce 1.

Tabulka 1 Technické parametry použitých lepidel.

Technické údaje	AG-COLL 8761 D3	NEOPUR 2238R
Viskozita (mPas)	7000 – 13000 při 23°C	2000 - 4500
Hustota (g/cm ³)	0,9 - 1,1	cca 1,13
Obsah sušiny (%)	49 - 51	100
Otevřený čas (min)	15	cca 20 - 25
Lisovací čas (min)	15 - 20	60
Obsah NCO (%)	-	cca 15,5 - 16,5
Barva	bílá, mléčná	hnědá
pH	3,8 - 4,5	-

4.2 Zjišťování úhlu letokruhů

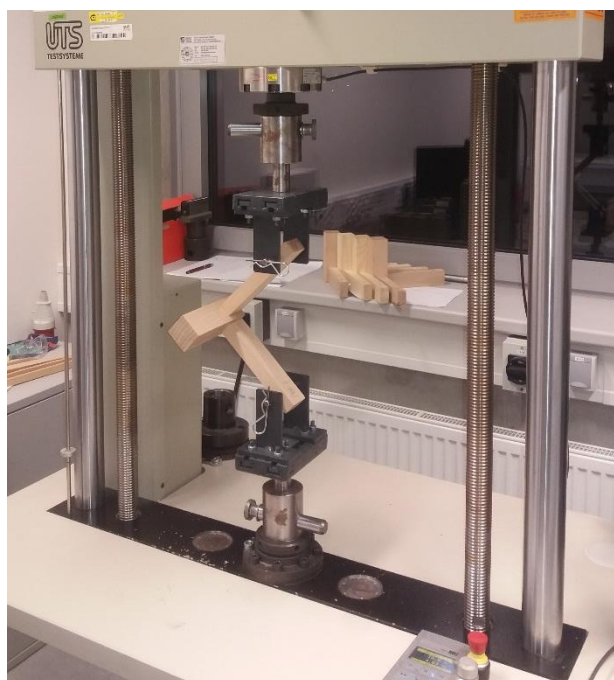
Během zkoušky se vzorky zařazovaly do tří skupin podle úhlu letokruhů na čelní straně sloupku. Do první skupiny se zařazovaly vzorky, jejichž letokruhy svíraly s jedním nebo druhým lubem úhel 90°. Do druhé skupiny se zařazovaly vzorky, jejichž letokruhy svíraly alespoň s jedním lubem úhel 45°. Třetí skupina byla určena pro vzorky, které nebylo možné přímo zařadit ani do jedné z předcházejících skupin. Rozdělení do skupin popisuje schématicky obrázek 26.



Obrázek 26 Schéma pro určení úhlu letokruhů (podle Záborský a kol., 2017).

4.3 Zkoušení vzorků

Uchycení zkušebních vzorků do univerzálního testovacího stroje TIRA 50 (TIRA systém GmbH, Německo) bylo provedeno pomocí speciálních ocelových úchytů, které ve svém výzkumu využili Podlena a Borůvka (2016). Zkušební vzorky byly fixovány k úchytům ocelovým čepem, procházejícím skrze otvor v lubu.

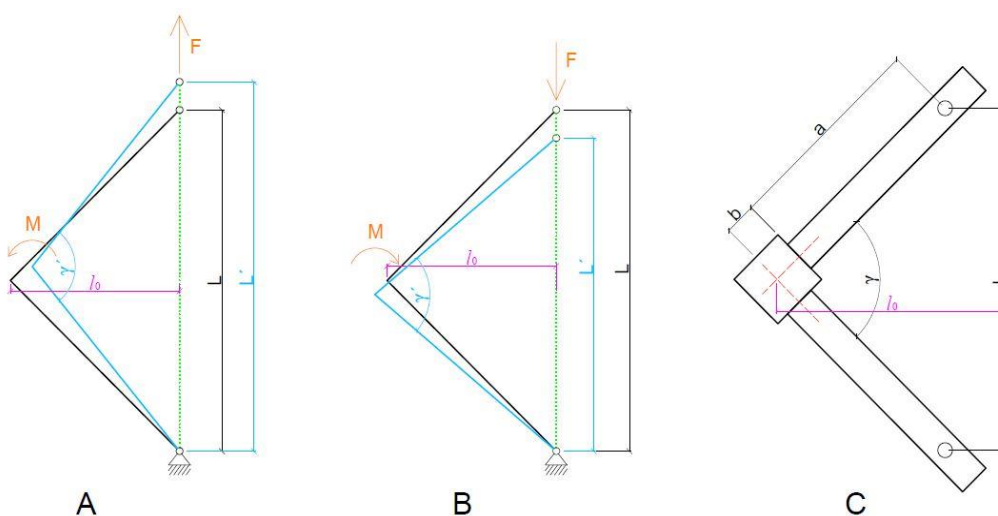


Obrázek 27 Uchycení vzorku do zkušebního stroje.

Vzorky rohových nábytkových spojů testovaných v této práci byly zatěžované tlakovým a tahovým namáháním. Působící síly při zatěžování způsobovaly ohybový moment, jehož hodnota se použila při výpočtu elastické tuhosti a tuhosti při maximálním zatížení. Rohové nábytkové spoje testované v této práci byly namáhané v úhlové rovině (viz obr. 27).

Zkouška probíhala až do porušení vzorku, kdy byla automaticky přerušena. Pokud nedošlo k ukončení, zkouška se zastavila uměle při prudkém klesání síly. Vyhodnocení v programu TIRA bylo ve formě pracovního diagramu průběhu zkoušky s údaji o síle a deformaci. Spolu s maximální zatěžovací silou se zaznamenávala síla a deformace na 10 a 40 % meze pevnosti spoje. Tyto údaje byly použity k dalším výpočtům. Schéma zatěžování tlakovým a tahovým namáháním je zobrazeno na obrázku 28. Každý zkušební vzorek byl po ukončení

zkoušky zváženy na digitální váze s přesností na dvě desetinná místa. Výsledná hodnota hustoty byla počítána pro celý testovaný vzorek, včetně kolíků a lepidla.



Obrázek 28 Zjednodušené schéma zatěžování vzorků A) tahem, B) tlakem, schéma reálného vzorku (C).

4.4 Měření šířky letokruhů

Po provedení testu byl ze vzorků odříznutý sloupek co nejbližší rohovému spoji. Nově vzniklé čelní plochy sloupku byly naskenovány a bylo na nich provedeno měření šířky letokruhů. Měření a vyhodnocování probíhalo v programu pro obrazovou analýzu NIS Elements AR. Na každém vzorku se měřily jednotlivé letokruhy, ze kterých se vypočítával průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. Měření bylo prováděno v pixelech, které se následně přepočítávaly na mm. Skenování probíhalo v rozlišení 600 DPI, tzn., že jeden pixel na skenovaném obrázku odpovídal 0,0423 mm na reálném objektu (Podlena a Borůvka, 2016). Statisticky zkoumána byla závislost hustoty na průměrné šířce letokruhů.

4.5 Použité výpočty

Působící síla na vzorky byla použita pro výpočet ohybového momentu M . Délka ramene síly l_0 byla konstantní, vypočtena z rozměrů vzorku a kosinu poloviny původního úhlu ($\gamma = 90^\circ$) podle rovnice 1. Ohybový moment uvažován ve výpočtech byl M_{max} a ΔM . M_{max} představoval maximální ohybový moment dosažený při maximální zatěžovací síle F , zatímco ΔM představoval rozdíl

momentu ve sledované oblasti mezi 10 a 40 % meze pevnosti spoje a byl použit pro zjištění elastické tuhosti. Výpočet ohybového momentu probíhal podle rovnice 2. Rovnice byly převzaty z výzkumu Podlena a Borůvka (2016).

$$l_0 = (a + b) \times \cos 45 \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

Kde:

a je vzdálenost osy úchyty a styku lubu se sloupkem, [mm]

b je vzdálenost styku lubu se sloupkem a průmětem os kolíků. [mm]

$$M = F \times l_0 \quad [\text{Nm}] \quad (2)$$

Kde:

F je zatěžující síla, [N]

l_0 je délka ramene síly. [m]

Síla působící na zkušební vzorek způsobovala v případě tlaku zkrácení a v případě tahu prodloužení vzdálenosti mezi ocelovými úchyty (L'). Se změnou vzdálenosti se měnil i úhel mezi luby (γ'), který byl vyjádřen podle rovnice 3. Vzdálenost a úhel na vzorku po působení síly jsou znázorněny na obrázku 28.

$$\gamma' = 2 \arcsin \frac{L'}{2(a+b)} \quad [\text{rad}] \quad (3)$$

Kde:

L' je vzdálenost mezi ocelovými úchyty, [mm]

a je vzdálenost osy úchyty a styku lubu se sloupkem, [mm]

b je vzdálenost styku lubu se sloupkem a průmětem os kolíků. [mm]

Ve výpočtu elastické tuhosti se počítá se změnou úhlu $\Delta\gamma$, který vyjadřuje velikost změny úhlu mezi 10 a 40 % maximální zatěžující síly. Změna úhlu byla vyjádřena pomocí rovnice 4. Přepočet mezi radiány a stupni byl prováděn podle rovnice 5.

$$\Delta\gamma = |90 - \gamma'| \quad [^\circ] \quad (4)$$

$$\pi \text{ rad} = 180^\circ \quad (5)$$

Výsledná elastická tuhost (C_{elast}) spoje a tuhost při maximálním zatížení (C) byly vypočteny z příslušných ohybových momentů (ΔM , M_{max}) a příslušných úhlů ($\Delta\gamma$, γ_{max}). Výpočty probíhaly podle rovnic 6 a 7.

$$C_{elast} = \frac{\Delta M}{\Delta\gamma} \quad [\text{Nm/rad}] \quad (6)$$

Kde:

ΔM je rozdíl momentu mezi 10 a 40 % meze pevnosti, [Nm]

$\Delta\gamma$ je rozdíl úhlu mezi 10 a 40 % meze pevnosti. [rad]

$$C = \frac{M_{max}}{\gamma_{max}} \quad [\text{Nm/rad}] \quad (7)$$

Kde:

M_{max} je ohybový moment při maximálním zatížení, [Nm]

γ_{max} je úhel při maximálním zatížení. [rad]

Hustota byla vypočtena z rozměrů a váhy celého spoje po odzkoušení podle ČSN 49 0108.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (8)$$

Kde:

m_w hmotnost při vlhkosti w , [g]

V_w objem při vlhkosti w . [cm³]

Vlhkost dřeva byla stanovena podle ČSN 49 0103.

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100 \quad [\%] \quad (9)$$

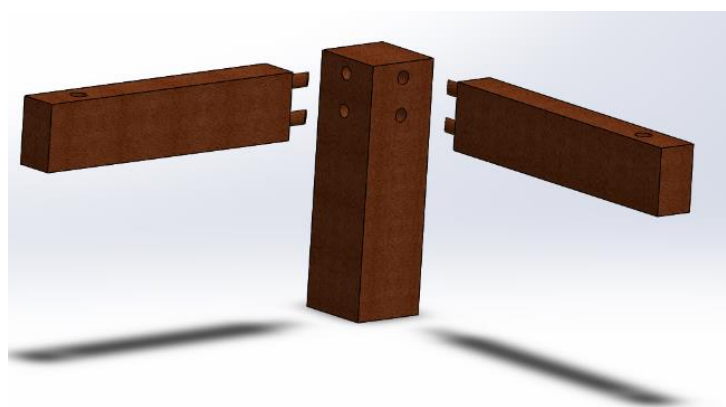
Kde:

m_0 hmotnost absolutně suchého dřeva, [g]

m_w hmotnost při vlhkosti w . [g]

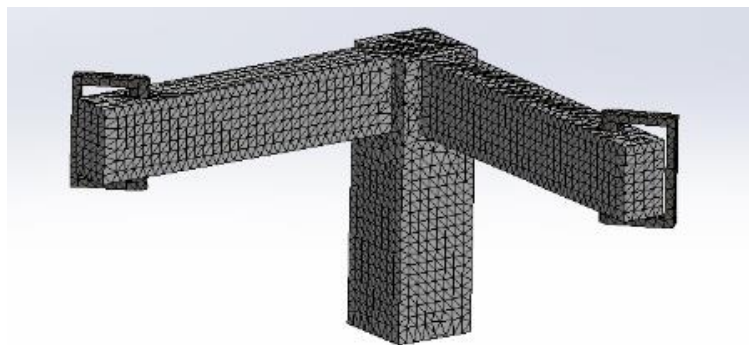
4.6 Simulace zatěžování

Vytváření modelu bylo prováděno v programu SolidWorks Premium 2015 a pro následnou simulaci byl použit doplňkový modul Simulation. V programu se vytvořil model prostorového rohového spoje s vlepenými kolíky, který odpovídal rozměrům reálného vzorku. Kasal (2016a) při simulaci rohového spoje použil vymodelovaný samostatný film lepidla, pro který byly zadány specifické parametry. Rohový kolíkový spoj v této práci se však definoval při simulaci jako globálně spojený. Program v takovém případě předpokládá, že tělesa jsou slepená, aniž by se musel modelovat a definovat film lepidla.



Obrázek 29 Model rohového spoje.

Po vytvoření modelu je nutné vytvořit síť konečných prvků, která je nezbytnou součástí pro simulaci deformace a průběhu napětí. Program SolidWorks sám dokáže síť konečných prvků navrhnout tak, aby vyhovovala následné simulaci. Pro provedení simulace zatížení je nutné zvolit velikost působící síly. V případě testovaných rohových spojů byla stanovena zatěžovací síla 225 N. Vytvořená síť konečných prvků je zobrazena na obrázku 30.



Obrázek 30 Síť konečných prvků na modelu.

Aby mohl program simulaci provést, bylo nutné do programu zadat hodnoty vybraných vlastností použitého materiálu. Jelikož nebyl uvažován film lepidla, zadávaly se pouze hodnoty bukového dřeva, které byly převzaty z literatury (Požgaj a kol., 1997, Dinwoodie, 2000). Hodnoty zadávané pro simulaci jsou uvedeny v tabulce 3. Mez kluzu bukového dřeva byla z důvodu absence v literatuře odhadnuta.

Tabulka 2 Hodnoty vlastností bukového dřeva použité pro simulaci.

Veličina	Jednotka	Hodnota
ρ_{12}	kg/m ³	750
$\sigma_{d }$	MPa	56,7
$\sigma_{d\perp R}$	MPa	12,9
$\sigma_{d\perp T}$	MPa	8,5
$\sigma_{t }$	MPa	133,5
$\sigma_{t\perp R}$	MPa	3,4
$\sigma_{t\perp T}$	MPa	4,4
$\tau_{LR }$	MPa	12,6
$\tau_{LT }$	MPa	15,1
$\tau_{LR\perp}$	MPa	14,2
E_{dL}	MPa	13700
E_{dR}	MPa	2240
E_{dT}	MPa	1140
G_{LR}	MPa	1610
G_{LT}	MPa	1060
G_{RT}	MPa	460
σ_k	MPa	90
μ_{RL}	-	0,450
μ_{TL}	-	0,510
μ_{TR}	-	0,750
μ_{LR}	-	0,073
μ_{RT}	-	0,360
μ_{LT}	-	0,044

Program po simulaci zobrazil na modelu průběh napětí ve spoji a celkovou deformaci, která představuje protažení nebo zkrácení vzdálenosti mezi ocelovými úchyty. K vykreslení napětí a deformace využívá program SolidWorks barevnou škálu, která znázorňuje velikost sledované deformace nebo průběhu napětí. Jednotlivým barvám je přiřazena číselná hodnota v mm, resp. v MPa. Zároveň jsou na modelu označena místa, kde deformace nebo napětí dosahuje maximálních a minimálních hodnot. Výsledky simulace se porovnávaly s experimentálně naměřenými údaji.

Experimentálně získaná data z průběhu zkoušek a měření byla statisticky zpracována a vyhodnocena v dalších programech. Použité statistické veličiny, ukazatele a metody jsou popsány v následující části práce.

4.7 Statistické zpracování dat

Zpracování dat probíhalo v programech Microsoft Excel a Statistica 12. Sumarizace a výpočty probíhaly v programu Excel. Výstupem byly tabulky obsahující statistické údaje. Následně se potřebná data importovala do programu Statistica 12, ve kterém probíhalo statistické vyhodnocení. Statistické veličiny, ukazatele a metody jsou popsány níže.

Aritmetický průměr

Průměry jsou velkou skupinou středních hodnot, které jsou definované jako funkce všech hodnot dané proměnné. Jedním z nejpoužívanějších průměrů je průměr aritmetický. Je definován jako součet všech prvků v souboru dělený počtem prvků. Udává, jaká stejná část z úhrnu hodnot numerické proměnné připadá na jednu jednotku (Likeš a kol., 1993).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (10)$$

Kde:

n je počet prvků v souboru,

\bar{x} je aritmetický průměr prvků v souboru.

Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka je druhou (kladnou) odmocninou z rozptylu. Udává, jak se v průměru v daném souboru odchylojí hodnoty proměnné od aritmetického průměru. Její výhodou je fakt, že vychází ve stejných jednotkách, v nichž jsou uváděny hodnoty proměnné (Likeš a kol., 1993).

$$S = \sqrt{S^2} \quad (11)$$

Rozptyl

Rozptyl je definován jako průměrná čtvercová odchylka jednotlivých hodnot od průměrné hodnoty. Udává se ve druhé mocnině jednotek, v nichž jsou uváděny jednotlivé hodnoty proměnné (Řezanková a Löster, 2013).

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (12)$$

Kde:

n je počet prvků v souboru,

\bar{x} je aritmetický průměr prvků v souboru.

Variační koeficient

Variační koeficient se definuje jako podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru. Vyjadřuje, jak velký podíl z hodnoty aritmetického průměru tvoří směrodatná odchylka. Variační koeficient je jediná míra relativní, která je bezrozměrným číslem. Vyjadřuje míru variability, která se často násobí stem a vyjadřuje v % (Řezanková a Löster, 2013).

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \times 100 \quad [\%] \quad (13)$$

Kde:

S je směrodatná odchylka,

\bar{x} je aritmetický průměr prvků v souboru.

Analýza rozptylu

Analýza rozptylu patří mezi metody porovnávající střední hodnoty souboru. Je často označována zkratkou ANOVA, vycházející z anglického názvu analysis of variance. Jde o statistickou metodu založenou na hodnocení vztahů mezi rozptyly porovnávaných souborů. Analýza rozptylu se používá pro zjištění vlivu jednoho nebo více faktorů (nominální proměnné) na proměnnou kvantitativní. Předmětem zkoumání jsou střední hodnoty testovaných skupin, ze kterých se zjistí jejich rozdílnost nebo shoda. Podle testové hypotézy H_0 není sledovaná proměnná závislá na daném faktoru. V případě testování rohových kolíkových spojů byla hypotéza H_0 potvrzena nebo zamítnuta na základě p-hodnoty (www.statsoft.cz, 2014a).

P-hodnota

P-hodnota je jedna z důležitých pojmů v teorii odhadů, podle které je možné zjistit, jestli je výsledek testu významný nebo nikoliv. Nezávisle na tom, jaká je zvolená hladina významnosti alfa, poskytuje informaci pro všechny hladiny. Nejběžnější hladina významnosti alfa (α) je 0,05, tedy interval spolehlivosti je 95%. Pokud je p-hodnota menší než alfa, zamítáme nulovou hypotézu H_0 . Pokud je větší než alfa, nulovou hypotézu nelze na dané hladině významnosti zamítnout. Důležité je vědět jak zní nulová hypotéza u prováděného testu (Budíková a kol., 2010; www.statsoft.cz, 2014b).

Korelační koeficient

Korelační koeficient charakterizuje závislost a její intenzitu mezi dvěma proměnnými. Koeficient nabývá hodnoty od -1 do 1 a značí pouze lineární závislost. Nulová hodnota znamená lineární nezávislost, hodnota 1 znamená úplnou lineární závislost. Kladný korelační koeficient vyjadřuje pozitivní korelaci, tzn., že se vzrůstající hodnotou jedné proměnné roste hodnota druhé proměnné. Záporná hodnota korelačního koeficientu značí negativní korelaci, tzn., že se vzrůstající hodnotou jedné proměnné hodnoty druhé proměnné klesají (Řezanková a Löster, 2013).

Čtverec korelačního koeficientu se nazývá koeficient determinace R^2 a je interpretován jako shoda modelu s daty. Nabývá hodnoty od 0 do 1, přičemž pokud je vynásoben 100, popisuje R^2 v procentech, jaký podíl celkové variability je vysvětlen využitým modelem (www.statsoft.cz, 2014c).

5 Výsledky

Kapitola obsahuje naměřená a vypočtená data. Výsledky jsou prezentované ve formě grafů, tabulek a obrázků. Kapitola je rozdělena do dvou větších celků. První část obsahuje výsledky měření zkušebních vzorků prezentované formou grafů a tabulek. Ve druhé části jsou výsledky počítačové simulace, které jsou ve formě obrázků znázorňujících deformaci a průběh napětí.

5.1 Výsledky měření

Hodnoty získané měřením byly zpracovány v programu Statistica 12. Pomocí tohoto programu byla provedena jednofaktorová a dvoufaktorová ANOVA. Cílem bylo statisticky vyhodnotit vliv jednotlivých faktorů na elastickou tuhost spoje. Zkoumané faktory byly typ lepidla, průměr kolíků, typ namáhání a úhel letokruhů. Grafy průběhu zkoušek byly získány přímo při testování v programu TIRA.

Tabulka 3 Výsledky hustoty a elastické tuhosti rohových spojů.

Typ namáhání	Průměr kolíků (mm)	Typ lepidla	Hustota (g/cm ³)			Elastická tuhost (Nm/rad)		
			průměr	sm. odchylka	variační koeficient (%)	průměr	sm. odchylka	variační koeficient (%)
Tlak	8	PVAc	0,699	0,020	2,9	546	240	44,0
Tlak	12	PVAc	0,699	0,010	1,5	1148	159	13,9
Tlak	8	PUR	0,708	0,012	1,6	724	217	29,9
Tlak	12	PUR	0,697	0,017	2,5	1174	228	19,5
Tah	8	PVAc	0,692	0,016	2,3	867	425	49,0
Tah	12	PVAc	0,696	0,015	2,2	1287	444	34,5
Tah	8	PUR	0,687	0,012	1,8	685	135	19,7
Tah	12	PUR	0,689	0,017	2,5	1093	227	20,7

Tabulka 3 ukazuje výsledky hustoty a elastické tuhosti pro každou skupinu testovaných vzorků. V tabulce 4 jsou zaznamenány hodnoty momentů a úhlů. Změna momentu ΔM představuje změnu momentu ve sledované oblasti mezi 10 a 40 % meze pevnosti spoje. Hodnota maximální změny úhlu vyjadřuje, o kolik se původní úhel 90° zmenšil, popř. zvětšil při maximální zatěžovací síle v závislosti

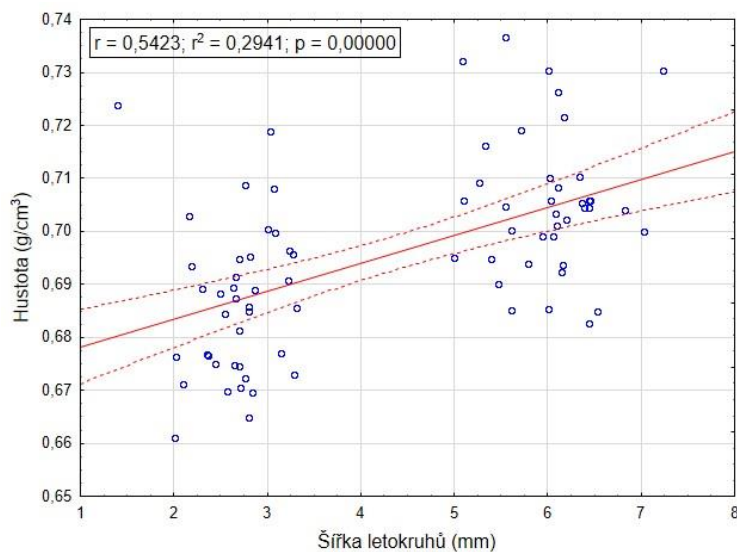
na typu namáhání. Změna úhlu $\Delta\gamma$ je vyjádřena ze sledované oblasti mezi 10 a 40 % meze pevnosti spoje.

Tabulka 4 Průměrné hodnoty úhlů a ohybových momentů.

Typ namáhání	Průměr kolíků (mm)	Typ lepidla	Maximální moment M_{\max} (Nm)	Změna momentu ΔM (Nm)	Maximální změna úhlu (°)	Změna úhlu $\Delta\gamma$ (°)
Tlak	8	PVAc	77,41	23,24	8,48	2,88
Tlak	12	PVAc	100,96	30,28	9,42	1,54
Tlak	8	PUR	63,55	19,07	5,91	1,62
Tlak	12	PUR	76,98	23,09	8,34	1,17
Tah	8	PVAc	68,51	20,53	7,28	1,56
Tah	12	PVAc	78,66	23,04	5,6	1,1
Tah	8	PUR	54,72	16,42	4,92	1,41
Tah	12	PUR	53,44	16,03	6,45	0,87

5.2 Statistické vyhodnocení

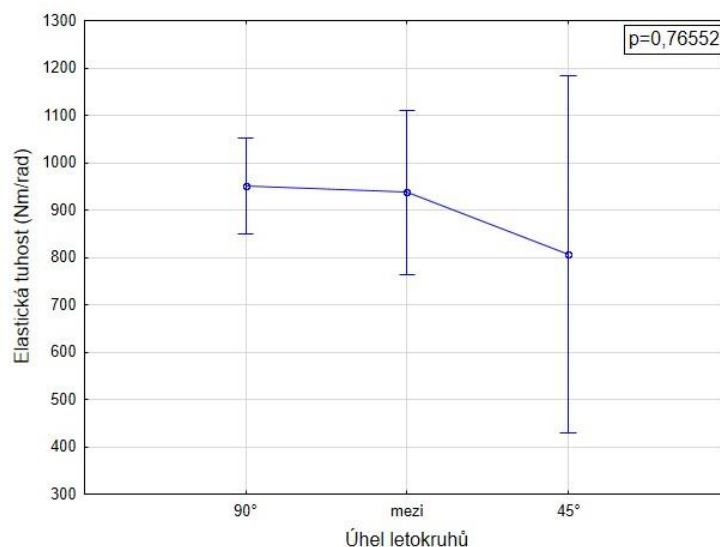
V této části jsou popsány výsledky korelační analýzy, jednofaktorové a dvoufaktorové ANOVY, které jsou ve formě grafů. Pomocí p hodnoty byly stanoveny statisticky významné a nevýznamné vlivy vybraných faktorů. Tato hodnota se porovnávala s nastavenou hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. Míra korelace byla definována korelačním koeficientem lineární závislosti R a koeficientem determinace R^2 . Jiná než lineární závislost se nebrala v úvahu.



Graf 1 Závislost hustoty na šířce letokruhů.

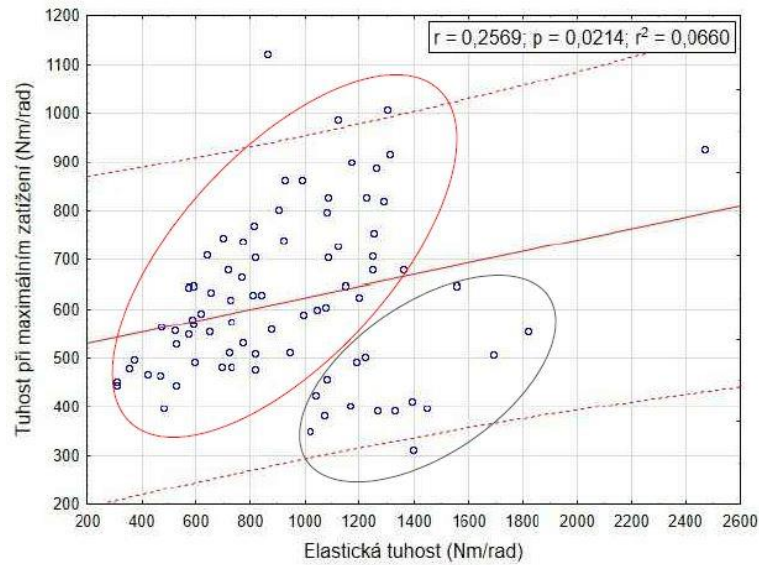
Graf 1 ukazuje závislost hustoty na šířce letokruhů, vyjádřené průměrem hodnot jednotlivých letokruhů z každého testovaného vzorku. Korelační koeficient dosáhl kladné hodnoty 0,54, což ukazuje mírnou lineární závislost. Hustota se zvyšuje se vzrůstající šířkou letokruhů. Koeficient determinace ukazuje, že variabilita je vysvětlena tímto modelem z 29 %.

Z tohoto grafu je také vidět rozdělení hodnot šířky letokruhů do dvou skupin. První skupina obsahuje vzorky s průměrnou šířkou letokruhů v intervalu zhruba 2 – 3,5 mm, zatímco ve druhé skupině jsou převážně vzorky s šířkou letokruhů v intervalu cca 5 – 7 mm. Důvodem je pravděpodobně použití minimálně dvou odlišných fošen při výrobě vzorků nebo použití středových fošen se zastoupením širokých i úzkých letokruhů.



Graf 2 Závislost elastické tuhosti na úhlu letokruhů.

Během zkoušky se vzorky zařazovaly do tří skupin podle úhlu letokruhů na čelní straně sloupku. Do první skupiny se zařazovaly vzorky, jejichž letokruhy svíraly s jedním nebo druhým lubem úhel 90°. Do druhé skupiny se zařazovaly vzorky, jejichž letokruhy svíraly alespoň s jedním lubem úhel 45°. Třetí skupina byla určena pro vzorky, které nebylo možné přímo zařadit ani do jedné z předcházejících skupin. Vliv úhlu letokruhů na elastickou tuhost je znázorněn na grafu 2. Nejmenší variability elastické tuhosti dosahují vzorky s úhlem letokruhů 90°. Naopak největší variabilitu vykazují vzorky ve skupině s úhlem 45°. Z hlediska významnosti je závislost elastické tuhosti na úhlu letokruhů statisticky nevýznamná ($p=0,76552$).



Graf 3 Vztah mezi elastickou tuhostí a tuhostí při maximálním zatížení.

Vztah mezi elastickou tuhostí a tuhostí dosažené při maximálním zatížení popisuje graf 3. Z hlediska p hodnoty se tato závislost považuje za statisticky významnou. Korelační koeficient dosahuje hodnoty pouze 0,2569, což značí velmi malou lineární závislost.

Zajímavé je bodové rozložení hodnot v celém grafu. Kromě dvou extrémních hodnot je možné hodnoty na grafu rozdělit do dvou skupin. V první, početnější skupině (v červené elipse) jsou vzorky, které mají strmější závislost mezi elastickou tuhostí a tuhostí při maximálním zatížení. Pokud by v grafu byly pouze tyto hodnoty, dá se předpokládat, že korelační koeficient by byl výrazně větší, což by značilo větší lineární závislost. Druhá skupina (v černé elipse) obsahuje vzorky, které mají relativně velkou elastickou tuhost, ale zároveň velmi malou tuhost při maximálním zatížení. Naprostou většinu tvoří v této části vzorky s 12 mm kolíky lepenými PUR lepidlem namáhanými tahem i tlakem. Skupina namáhaná tahovým namáháním vykazovala průměrně nejmenší sílu potřebnou k porušení v porovnání s ostatními skupinami, včetně vzorků s 8 mm kolíky. Dalším společným znakem je nejmenší průměrná změna protažení a s tou související nejmenší změna úhlu ve sledované oblasti zatížení (mezi 10 a 40 % maximální zatěžovací síly). Skupina namáhaná tlakem nebyla v průměrných hodnotách odlišná od zbytku.

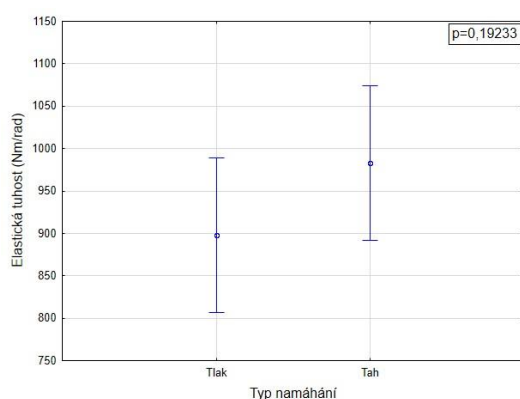
Vyhodnocení vlivu typu namáhání, průměru kolíků a typu lepidla na elastickou tuhost bylo provedeno pomocí jednofaktorové a dvoufaktorové

analýzy rozptylu (ANOVA). Souhrnné výsledky testu jsou uvedeny v tabulce 5, která popisuje vliv faktoru nebo kombinaci faktorů pomocí p-hodnoty. Pouze průměr kolíku a kombinace typu lepidla a typu namáhání vykazují statisticky významný vliv na elastickou tuhost spoje.

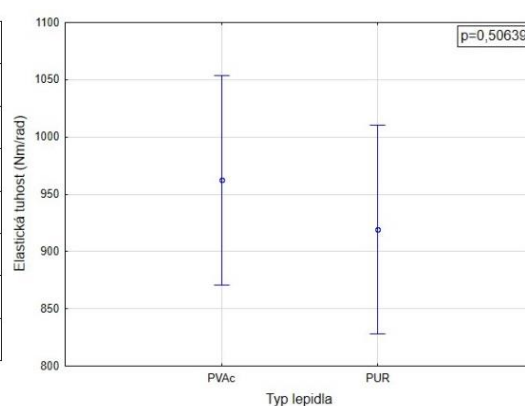
Tabulka 5 Souhrnné výsledky analýzy rozptylu.

Efekt	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	F-test	p
Absolutní člen	70783375	1	70783375	845,9412	0,000000
Typ namáhání	144924	1	144924	1,7320	0,192329
Průměr kolíku	4411343	1	4411343	52,7205	0,000000
Typ lepidla	37317	1	37317	0,4460	0,506388
Typ namáhání*průměr kolíku	63174	1	63174	0,7550	0,387786
Typ namáhání*typ lepidla	418984	1	418984	5,0073	0,028335
Průměr kolíku*typ lepidla	33888	1	33888	0,4050	0,526535
Chyba	6024535	72	83674		

Grafy 4 a 5 ukazují vliv typu namáhání, resp. typu lepidla na elastickou tuhost. Ačkoli vzorky zatížené tahem dosahují v průměru o cca 10 % větší elastické tuhosti, typ namáhání nemá statisticky významný vliv na výslednou elastickou tuhost v 95 % intervalu spolehlivosti ($p > 0,05$). Průměrně lepších hodnot dosahují vzorky lepené PVAc lepidlem, nicméně rozdíl je pouze cca 5 %. I tento vliv se však ukazuje jako statisticky nevýznamný ($p = 0,50639$).



Graf 4 Vliv typu namáhání na elastickou tuhost.

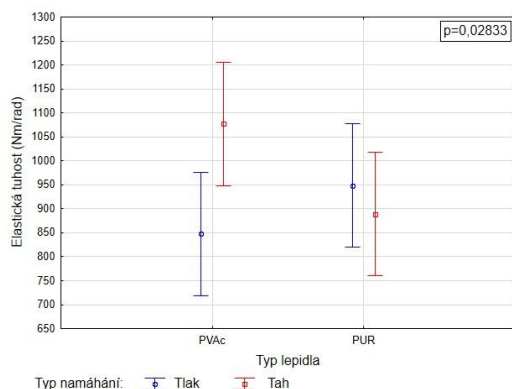


Graf 5 Vliv typu lepidla na elastickou tuhost.

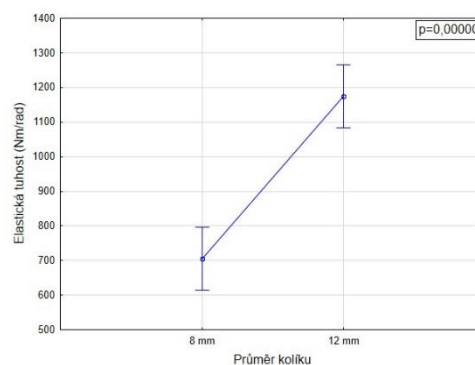
Ačkoli se při zatěžování tahem a tlakem očekávaly podobné výsledky, vzorky zatěžované tahem dosahovaly mírně vyšších hodnot. Geometrie kolíkového spoje (viz obr. 24 a 25) přispívala teorii, že větší tuhosti spoje dosáhnou vzorky zatěžované tlakovým namáháním. Kolíky byly zařezávány na pokos a byla ponechána technologická mezera mezi stykem pokosových ploch kolíků na případný přebytek lepidla. Při zatěžování tlakem se kolíky opírají o vnitřní stěnu sloupku větší prolepenou plochou a z tohoto důvodu byla očekávána větší tuhost spoje. Výsledky však ukazují, že tento faktor na výslednou tuhost nemá vliv.

Vliv na elastickou tuhost nevykazuje samostatně ani typ namáhání ($p=0,192$) ani typ lepidla ($p=0,506$). Kombinace obou těchto faktorů však má na elastickou tuhost statisticky významný vliv ($p=0,0283$). Z grafu 6 je vidět, že vzorky lepené PVAc lepidlem a zatěžované tlakem dosahují menších hodnot elastické tuhosti než vzorky taktéž lepené PVAc lepidlem a zatěžované tahem.

Nárůst elastické tuhosti je cca o 27 %. Vzorky lepené PUR lepidlem vykazují opačnou tendenci. PUR lepidlo v kombinaci s tlakovým namáháním dosahuje oproti tahu o cca 5 % vyšších hodnot. Tento vliv je však statisticky nevýznamný.



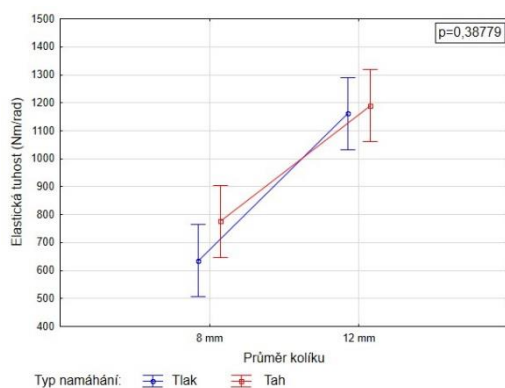
Graf 6 Vliv typu lepidla a typu namáhání na elastickou tuhost.



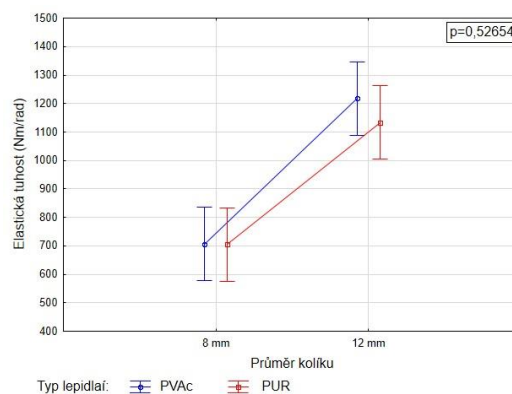
Graf 7 Vliv průměru kolíku na elastickou tuhost.

Jediný faktor, který má samostatně statisticky významný vliv na elastickou tuhost je průměr použitých kolíků. Tento vliv ukazuje graf 7. Použitím kolíků o průměru 12 mm oproti 8 mm kolíků se zvyšuje elastická tuhost zhruba o 66%.

Kombinaci vlivu průměru kolíků a typu namáhání popisuje graf 8. Při použití 8 mm kolíků je spoj v tahu pevnější než spoj v tlaku o cca 22 %. Tento nárůst pevnosti se však při použití 12 mm kolíků sníží a rozdíl v elastické tuhosti spoje je minimální. Velký rozdíl v nárůstu elastické tuhosti je u tlakového namáhání, které se použitím většího průměru kolíků zvyšuje o 82 %. U tahového namáhání se zvyšuje při větším průměru kolíků tuhost o 53 %.



Graf 8 Vliv průměru kolíku a typu namáhání na elastickou tuhost.



Graf 9 Vliv průměru kolíku a typu lepidla na elastickou tuhost.

Průměrné hodnoty naměřené u vzorků s 8 mm kolíky jsou téměř totožné při použití PVAc a PUR lepidla, viz graf 9. Při použití 12 mm kolíků vykazují mírně větší hodnoty vzorky lepené PVAc lepidlem, a to o cca 7 %. Větší rozdíly jsou pak opět u porovnání stejného lepidla u 8 mm a 12 mm kolíků. U PVAc lepidla je nárůst elastické tuhosti o 72 %. U PUR lepidla je tento nárůst o 60 %. Ani kombinace průměru kolíku a použitého lepidla však nevykazuje statisticky významný vliv na elastickou tuhost spoje ($p=0,5265$).

5.3 Grafy průběhu zkoušky

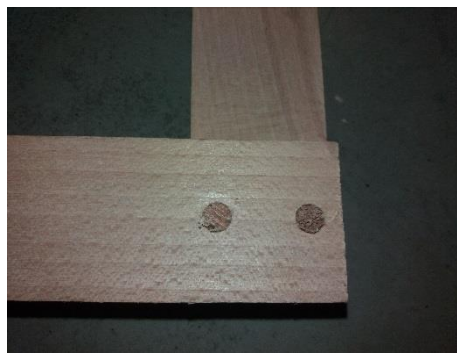
Během zatěžování tlakovým a tahovým namáháním se kromě nastavených údajů o každém vzorku vykresloval graf průběhu zkoušky. Ve většině případů, nehledě na průměr kolíků nebo použitého lepidla, měl graf podobný průběh jako klasický pracovní diagram napětí-deformace. Některé vzorky napříč skupinami však vykazovaly jisté anomálie během průběhu zkoušky. Ve dvou případech vykazovaly téměř všechny vzorky ve skupině podobný tvar grafu, odlišný od předpokladu. Anomálie průběhu grafu lze připisovat faktu, že některé konstrukční

otvory bylo nutné dovyvrtat. Tento stav mohly způsobit s největší pravděpodobností dva faktory. Větší vlhkost dřeva při výrobě a následné seschnutí a zmenšení průměru konstrukčního otvoru (v rámci desetin milimetru) nebo pravděpodobněji broušené ostří vrtacího nástroje, a s tím spojený menší průměr vytvořeného otvoru. Některé konstrukční otvory bylo tedy nutné před slepením dovyvrtat, čímž mohly vzniknout nepřesnosti, které způsobily níže popsané anomálie průběhu zkoušky.

Hlavní rozdíl při testování mezi skupinami s 8 mm a 12 mm kolíky byl ve způsobu porušení. Při použití tenčích kolíků lepená plocha zůstala většinou nepoškozena a k porušení docházelo ve většině případů v kolíku na spoji lubu se sloupkem (obr. 31 a 32).



Obrázek 31 Porušení spoje v kolíku (lub).



Obrázek 32 Porušení spoje v kolíku (sloupek).

Opačný výsledek byl pozorován ve spojích s 12 mm kolíky, u kterých nedošlo v žádném případě k fatálnímu porušení samotného kolíku. Nejčastěji docházelo k porušení v lepené ploše a následnému povytažení z konstrukčního otvoru (obr. 33). Častým jevem byl také vznik praskliny, která se objevovala jen na čelní straně sloupku, nebo se rozšířila i do plochy (obr. 34).



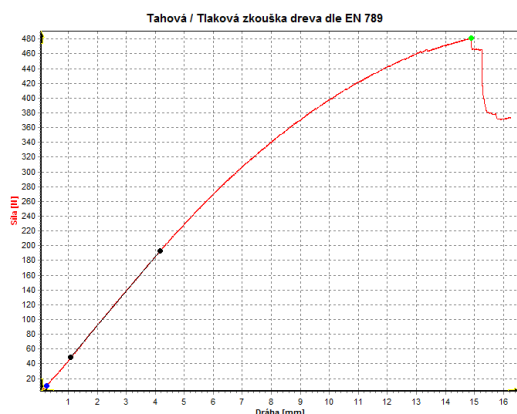
Obrázek 33 Povytažení kolíku.



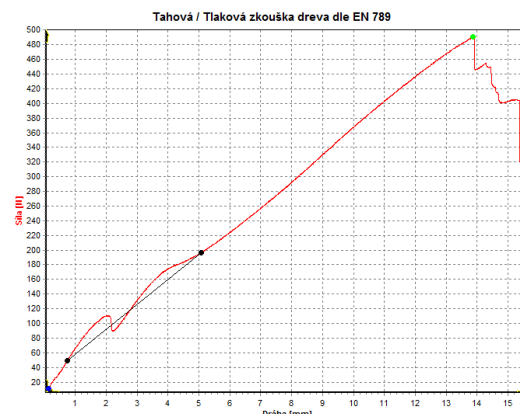
Obrázek 34 Prasklina na čelní straně sloupku.

Při zatěžování jednotlivých vzorků se vykresloval graf průběhu zkoušky. Křivka grafu zachycuje změnu síly a dráhy během testu až do meze pevnosti spoje. Přímkou ohraničená oblast mezi 10 a 40 % meze pevnosti celého spoje. Data z této oblasti byla použita k výpočtu výsledné elastické tuhosti.

Tahové namáhání, PVAc lepidlo, 8 mm kolíky



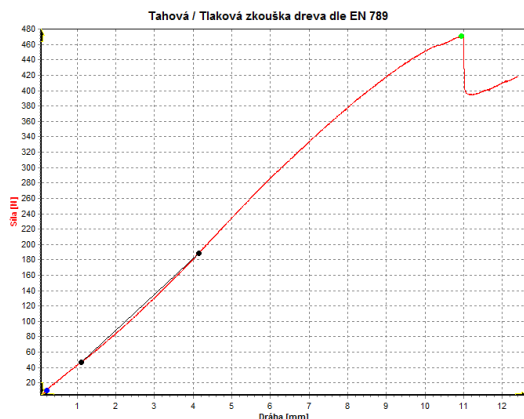
Graf 10 Tahové namáhání, PVAc lepidlo, 8 mm kolíky.



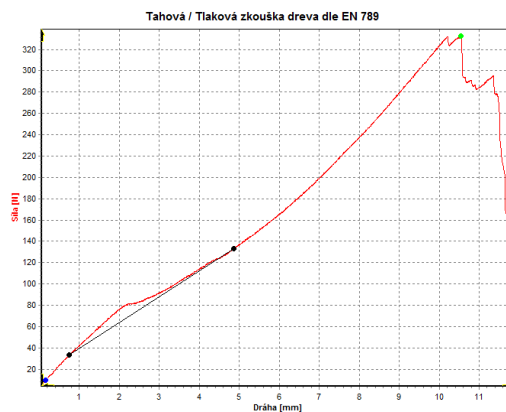
Graf 11 Tahové namáhání, PVAc lepidlo, 8 mm kolíky (2).

Na grafu 10 je vidět očekávaný průběh zkoušky, kde oblast pružné deformace je lineární. Ve stejné skupině vzorků se objevil atypický průběh zkoušky (graf 11), kde je vidět okolo 100 N náhlý pokles síly. Než se síla dostala na stejnou úroveň, došlo ke zvýšení deformace zhruba o 0,5 mm. K poklesu mohlo dojít např. porušením v lepené ploše a následnému opření kolíků.

Tahové namáhání, PUR lepidlo, 8 mm kolíky



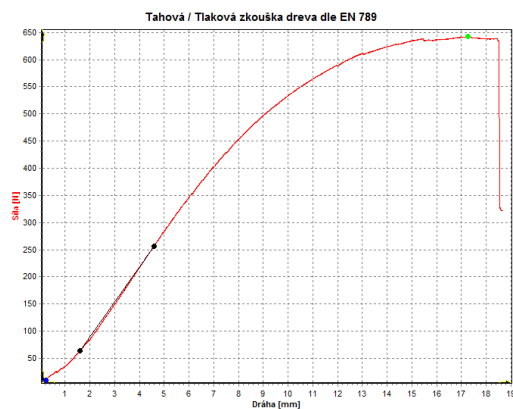
Graf 12 Tahové namáhání, PUR lepidlo, 8 mm kolíky.



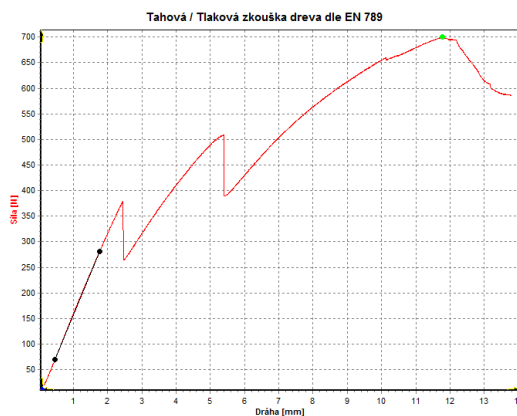
Graf 13 Tahové namáhání, PUR lepidlo, 8 mm kolíky (2).

Vzorky s 8 mm kolíky lepenými PUR lepidlem vykazovaly podobné průběhy jako u PVAc lepidla. Na grafu 12 je vidět mírně prohnutá křivka pružné deformace, kde graf netvoří ideální přímku. Opačná nelinearita je vidět na grafu 13. Zajímavá je i celková křivka grafu, která je spíše konvexní.

Tahové namáhání, PVAc lepidlo, 12 mm kolíky



Graf 14 Tahové namáhání, PVAc lepidlo, 12 mm kolíky.

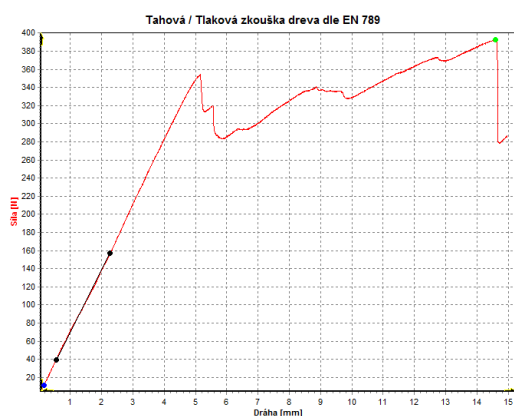


Graf 15 Tahové namáhání, PVAc lepidlo, 12 mm kolíky (2).

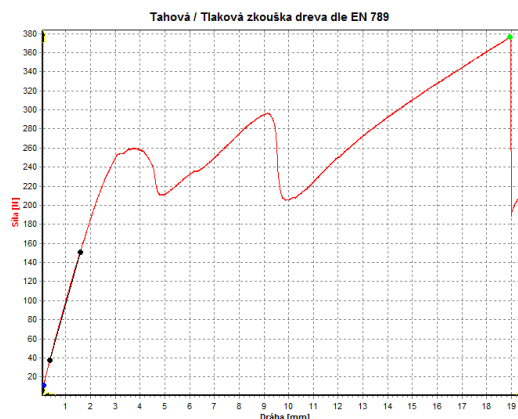
Na grafu 14 je vidět opět očekávaný průběh zkoušky, který byl typický pro celou skupinu. Jediný zvláštní průběh je zaznamenán na grafu 15, na kterém jsou vidět dva náhlé poklesy síly. Možným vysvětlením může být vznik malé praskliny, která neměla fatální vliv na celý vzorek. Další důvod skokového poklesu síly může

být vytečení lepidla mezi sloupek a lub. Při zatěžování tahem se poté jedna hrana lubu (ve směru síly) opírá a následně vtláčuje do sloupku. Druhá hrana lubu (proti směru síly) má tendenci se oddalovat a tím vzniká mezera mezi sloupkem a lubem. Lepidlo na styku ploch by vzniku mezery zabraňovalo až do porušení, které by se projevilo náhlým poklesem síly, podobně jako na grafu 15.

Tahové namáhání, PUR lepidlo, 12 mm kolíky



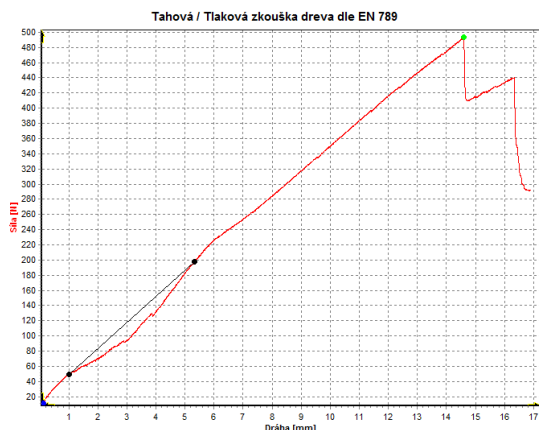
Graf 16 Tahové namáhání, PUR lepidlo, 12 mm kolíky.



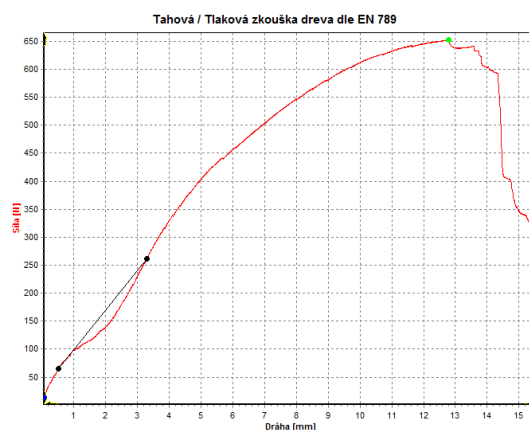
Graf 17 Tahové namáhání, PUR lepidlo, 12 mm kolíky (2).

Na grafu 16 a 17 jsou vidět velmi atypické průběhy zkoušky. Téměř všechny vzorky v této skupině měly obdobné tvary křivek. První náhlý pokles síly je možné vysvětlit opřením zešikmených ploch kolíků o sebe. Druhý pokles síly může být způsoben vznikem malé praskliny nebo podobně jako u stejné skupiny lepené PVAc lepidlem. Tato skupina se vyznačovala nejmenší silou potřebnou k porušení vzorků, nejmenší průměrnou změnou protažení a s tou související nejmenší změnou úhlu ve sledované oblasti zatížení. Ze všech skupin s 12 mm kolíky dosahovala také nejmenší průměrné elastické tuhosti.

Tlakové namáhání, PVAc lepidlo, 8 mm kolíky



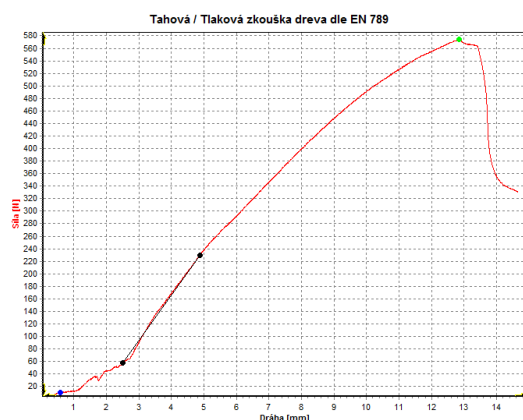
Graf 18 Tlakové namáhání, PVAc lepidlo, 8 mm kolíky.



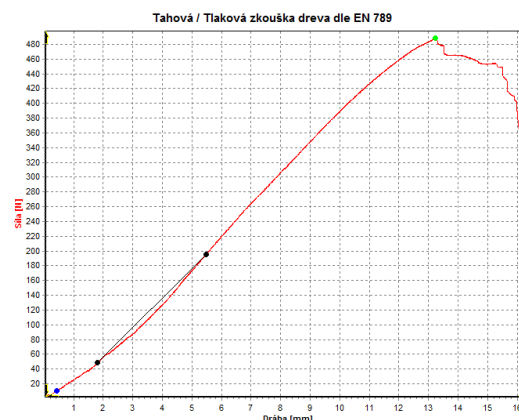
Graf 19 Tlakové namáhání, PVAc lepidlo, 8 mm kolíky (2).

Grafy vzorků s 8 mm kolíky lepenými PVAc lepidlem zatěžované tlakem vykazovaly nelineárnost v pružné oblasti namáhání (graf 18 a 19). Ve sledované oblasti má křivka konvexní průběh, kde se v první části zvyšuje deformace za malého nárůstu síly. To může být způsobeno např. pozvolným opíráním kolíku ve spoji, kdy pozvolnost zajišťuje přítomnost lepidla ve vřích. Lze si to také vysvětlit opíráním lubu o sloupek, kdy se při zatěžování jedna strana lubu opírá o sloupek a na druhé straně je tendence výskytu mezery (podobně jako u grafu 15, ale s absencí lepidla mezi lubem a sloupkem).

Tlakové namáhání, PUR lepidlo, 8 mm kolíky



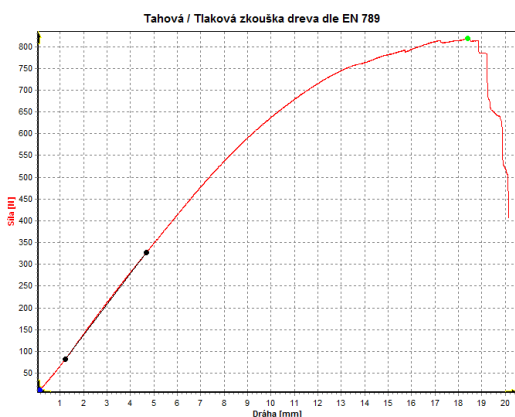
Graf 20 Tlakové namáhání, PUR lepidlo, 8 mm kolíky.



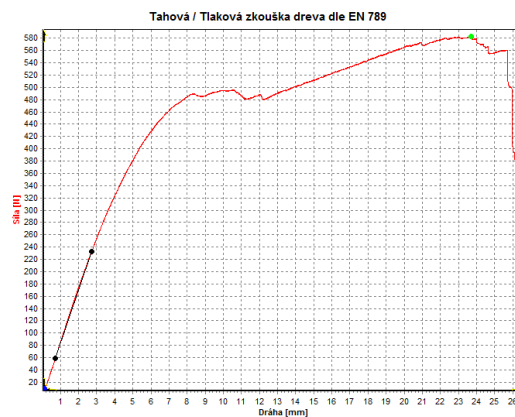
Graf 21 Tlakové namáhání, PUR lepidlo, 8 mm kolíky (2).

V této skupině testovaných vzorků nedocházelo k výrazným odchylkám od standardního průběhu grafu. Pouze křivka v pružné oblasti deformace vykazovala v několika případech nelineárnost a mírně konvexní průběh podobný jako v případě PVAc lepidla (graf 18 a 19).

Tlakové namáhání, PVAc a PUR lepidlo, 12 mm kolík



Graf 22 Tlakové namáhání, PVAc lepidlo, 12 mm kolík.



Graf 23 Tlakové namáhání, PUR lepidlo, 12 mm kolík.

V případě vzorků lepených PVAc lepidlem a použitými 12 mm kolíky je průběh testu normální s klasickým průběhem. Obdobně jako při zatěžování tahem (viz graf 14). Jistá podobnost grafů je i v případě použití PUR lepidla, jak je vidět na grafu 23. Oproti tahu nevzniká skokový pokles síly, ale spíše stagnace, resp. velmi mírný nárůst zatěžovací síly a růst deformace. Důvodem může být porušování lepené plochy a s tím spojené postupné povytahování kolíku z konstrukčního otvoru.

Některé grafy zkoušek vykazují atypický průběh, který se velmi liší od obecného pracovního diagramu. Jedná se především o náhlé propady nebo velmi pozvolné zvyšování zatěžovací síly se vzrůstající deformací. V naprosté většině případů tyto odchylky od normálního průběhu nezasahují do sledované oblasti. Nemají tedy vliv na elastickou tuhost. Zatímco mezi 10 a 40 % zatěžovací síly je deformace minimální, od vrchní hranice sledované oblasti po mez pevnosti spoje je deformace většinou několikanásobná. Nárůst síly od vrchní hranice je v porovnání s deformací malý. Tyto fakty negativně ovlivňují tuhost spoje

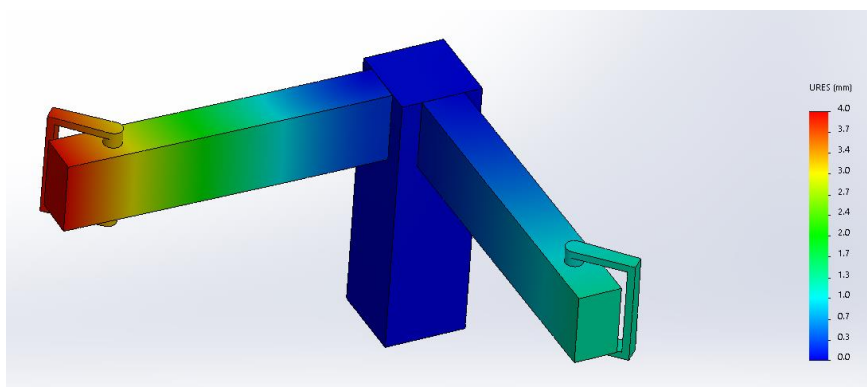
při maximálním zatížení. To je zřejmě důvod špatné korelace mezi elastickou tuhostí a tuhostí při maximálním zatížení, kde korelační koeficient lineární závislosti dosahuje hodnoty pouze 0,2569.

5.4 Výsledky počítačové simulace

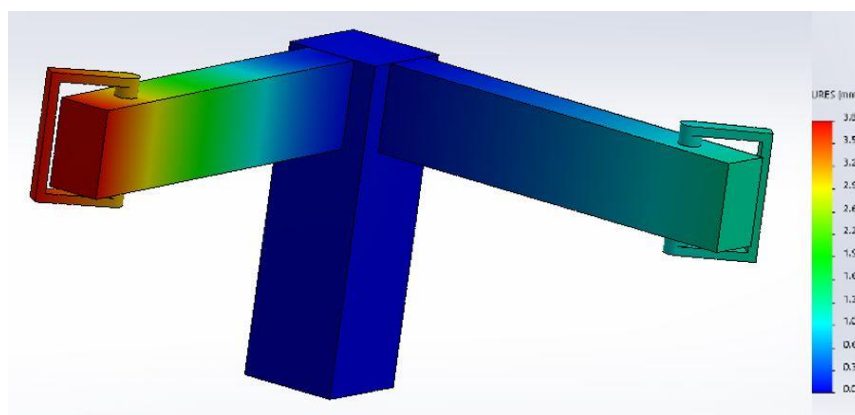
Simulace rohového kolíkového spoje ukazují deformaci a průběh napětí na modelu. Deformace představuje prodloužení nebo zkrácení vzdálenosti mezi ocelovými úchyty podle typu namáhání. Simulace průběhu napětí ukazuje, kde a jak velké napětí ve spoji působí.

Deformace, 8 mm kolíky

U simulace tahového namáhání bylo dosaženo deformace mezi ocelovými úchyty lehce přes 4 mm. Při simulování tlakového namáhání dosahovala deformace velmi podobných hodnot, lišících se v řádu jednotek desetin mm. Získané hodnoty ze simulace lze porovnat s grafy průběhu zkoušek vzorků s 8 mm kolíky.



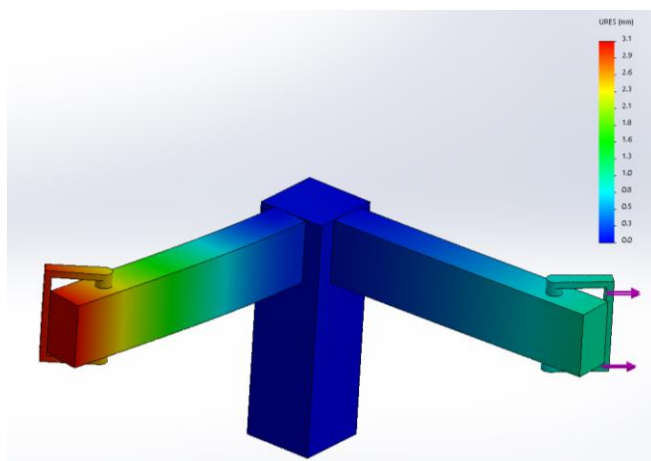
Obrázek 35 Simulace deformace při tahovém namáhání, 8 mm kolíky.



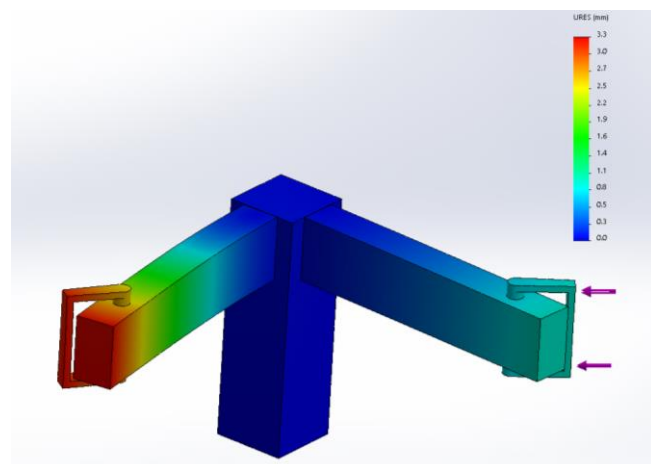
Obrázek 36 Simulace deformace při tlakovém namáhání, 8 mm kolíky.

Deformace, 12 mm kolíky

Deformace dosažená při simulaci tlakového a tahového namáhání se podobně jako u spojů s 8 mm kolíky liší pouze v řádu jednotek desetin milimetru. Celková deformace dosahuje lehce přes 3 mm, což je zhruba o jeden milimetr méně než při simulaci spojů s 8 mm kolíky. Hodnoty deformace ze simulace je možné porovnávat s grafy průběhu zkoušek výše, kde deformace při zatěžovací síle 225 N dosahovala podobných hodnot.



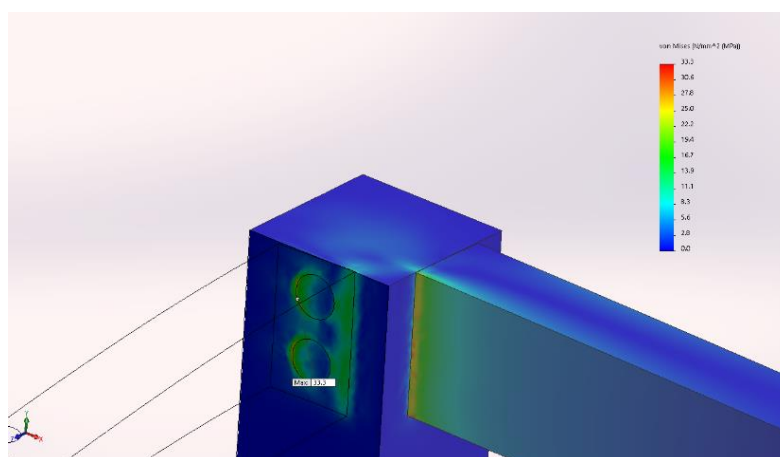
Obrázek 37 Simulace deformace při tahovém namáhání, 12 mm kolíky.



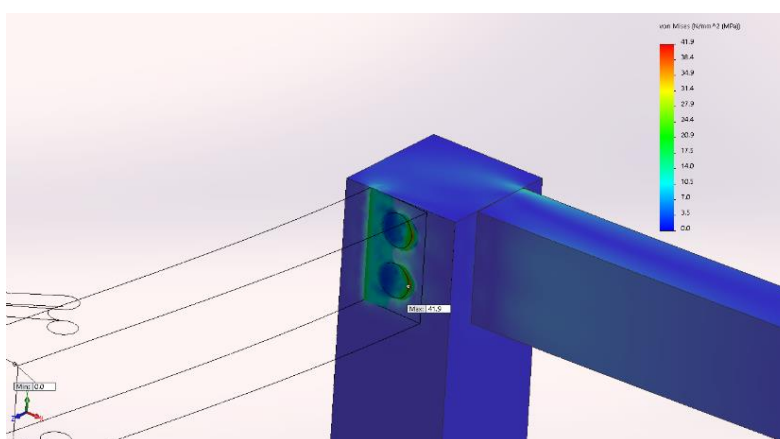
Obrázek 38 Simulace deformace při tlakovém namáhání, 12 mm kolíky.

Simulace průběhu napětí

Simulace barevně označuje průběh napětí při nastaveném působení síly 225 N. Největší napětí vzniká na straně kolíku, která se při zvoleném namáhání opírá o vnitřní stranu konstrukčního otvoru. Další zóna napětí vzniká v místě, kde se při zvoleném namáhání opírá lub o sloupek. V obou případech napětí přesahuje pevnost dřeva a dochází k jeho deformaci. V reálném případě se velké napětí projevuje vtlačením hrany lubu do sloupku a deformací kolíku a vnitřní strany konstrukčního otvoru. Průběhy napětí jsou znázorněné na obrázcích 39 a 40.



Obrázek 39 Průběh napětí při tlakovém namáhání, 12 mm kolík.



Obrázek 40 Průběh napětí při tahovém namáhání, 12 mm kolík.

6 Diskuze

Hodnocení porušení spojů

Hlavní rozdíl při testování mezi skupinami s 8 mm a 12 mm kolíky byl ve způsobu porušení. Při použití 8 mm kolíků lepená plocha zůstala většinou nepoškozena a k porušení docházelo ve většině případů v kolíku na spoji lubu se sloupkem. Opačný výsledek byl pozorován ve spojích s 12 mm kolíky, u kterých nedošlo v žádném případě k fatálnímu porušení samotného kolíku. Nejčastěji docházelo k porušení v lepené ploše a následnému povytažení kolíku z konstrukčního otvoru, většinou ze sloupku.

Vzhledem k tomu, že kolíky byly zapuštěny stejně hluboko (v ose), je možné připsat tuto skutečnost způsobu lepení. Do lubů se kolíky vtačily až na konec konstrukčního otvoru, čímž bylo lepidlo vtlačeno do drážek a rozvedeno do plochy kolíku. Kolíky následně byly zaříznuty na pokos tak, aby byla ve sloupku ponechána technologická mezera 1 – 2 mm. Při následném lepení lubů ke sloupku nemělo přebytečné lepidlo tendenci se tlačit zpět do rýh. Tímto by se dal vysvětlit fakt, že ve spojích s 12 mm kolíkem docházelo k vytažení většinou z konstrukčního otvoru sloupku.

Porovnání výsledků zkoušek a simulace

Zatěžující síla při simulaci byla nastavena na 225 N. Simulace ukazuje velmi podobné výsledky při zatěžování tahovým a tlakovým namáháním, lišících se v řádu jednotek desetin mm. U spojů s 8 mm kolíky dosahovala deformace cca 4 mm, zatímco u spojů s 12 mm kolíky byla deformace cca 3 mm. Simulované deformace je možné porovnat s testovanými vzorky. V případě klasického průběhu zkoušky, podobnému obecnému pracovnímu diagramu zatěžování dřeva, se reálná deformace blížila hodnotám deformace simulované.

Ze simulace průběhu napětí je zřejmé, že nejvíce se koncentruje napětí na hraně styku lubu se sloupkem ve směru působení síly a na straně kolíku proti směru působení síly. Zajímavý je fakt, že napětí dosahovalo vyšších hodnot při simulaci tahového namáhání než při simulaci tlakového namáhání. V případě 12 mm kolíků činil rozdíl v napětí cca 9 MPa, u spojů s 8 mm kolíky byl rozdíl 8 MPa (při použité

síle 225 N). Napětí u spojů s 8 mm kolíky dosahovalo výrazně vyšších hodnot. Tento fakt lze vysvětlit menší plochou, kterou se kolík opírá o konstrukční otvor. Vyšší napětí u spojů s 8 mm kolíky způsobovalo překonání pevnosti dřeva a právě u těchto spojů často docházelo k porušení právě v kolíku v místech spojení lubu se sloupkem. Tuto teorii potvrzuje Smardzewski et al. (2004), který zjistil při simulaci kolíkového spoje, že nejvyšší napětí se koncentruje v kolíku v místě styku spojovaných dílců.

Vyhodnocení šířky letokruhů

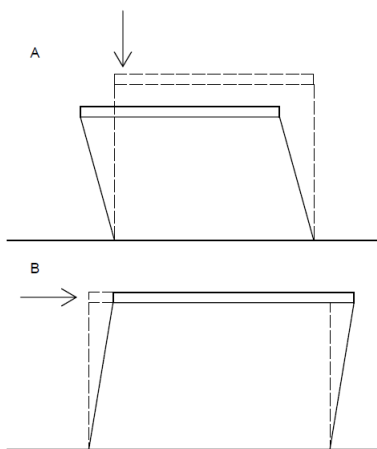
Diaconu et al. (2016) uvádí významný, avšak velmi mírný, vliv šířky letokruhů na hustotu bukového dřeva. Tento vliv lze pozorovat i ve výsledcích této práce na grafu 1, znázorňujícího závislost hustoty na šířce letokruhů. Hustota se mírně zvyšovala s rostoucí šířkou letokruhů. Korelační koeficient lineární závislosti dosahoval hodnoty 0,5423, což ukazuje mírnou závislost.

Průběh grafů zkoušek

Některé grafy zkoušek vykazovaly velmi netypický průběh, který se výrazně lišil od pracovního diagramu. Šlo převážně o náhlé propady síly nebo její pozvolné zvyšování s velkým nárůstem deformace. Ve většině případů tyto odchylky neměly vliv na elastickou tuhost, neboť nezasahovaly do sledované oblasti. Výrazný vliv však měly na tuhost při maximálním zatížení. Při odchylkách v průběhu zkoušek docházelo k výraznému nárůstu deformace a nevelkému nárůstu síly (ze 40 % na 100 %). Vzorky s atypickým průběhem zkoušky v nesledované části grafu vykazovaly malou tuhost při maximálním zatížení v porovnání s elastickou tuhostí. Tímto je možné vysvětlit malou lineární závislost mezi elastickou tuhostí a tuhostí při maximálním zatížení, kde korelační koeficient dosahoval hodnoty pouze 0,2569 (viz graf 3).

Porovnání výsledků s jinými autory

Problematika rohových spojů je předmětem mnoha výzkumů, které však svým charakterem neodpovídají způsobu testování v této práci. V této práci jsou testované prostorové spoje, které imitují spojení lubů se sloupkem (nábytkovou nohou). Vzorky jsou zatěžovány v úhlové rovině na plocho (obr. 27). Takové druhy spoje se vyskytují např. u regálů, dětských postýlek a u sedacího nebo stolového nábytku. Klasická konstrukce stolu nebo židle obsahuje většinou spojení lubů s nohou. Při používání však síly zatěžují spoje v úhlové rovině bokem, jak je vidět na obrázku 43. Namáhání spoje lubů s nohou v konstrukci židle nebo stolu stejně jako v této práci brání většinou deska sedáku, která prostorově celou konstrukci zpevňuje. Schéma zatěžování stolu je na obrázku 42. Na obrázku 43 je zatěžovací zkouška židle (Kasal et al., 2016b). Na obrázku je patrné, jakým způsobem jsou spoje namáhané. Jedná se o namáhání středových (T-spoje) a rohových spojů (L-spoje), kterým se věnují např. Kasal et al. (2016b), Uysal et al. (2015) nebo Hajdarević and Ibrahim (2015).



Obrázek 41 Schéma zatěžování stolu (podle ČSN 91 0100).



Obrázek 42 Zatěžovací zkouška židle (Kasal et al., 2016b).

Problematice rohových spojů stejné geometrie se zabýval Záborský a kol. (2017), který zkoumal elastickou tuhost rohových nábytkových spojů z bukového a smrkového dřeva, jejichž spojovacím prvkem byl dlab a čep s perem. Porovnání výsledků s tímto autorem je přínosné zvláště proto, že na testování byly použity vzorky se stejnými rozměry, namáhání probíhalo stejným způsobem a sledované faktory byly také stejné (typy namáhání, typy lepidla). Lišil se jen typ spojovacího prostředku.

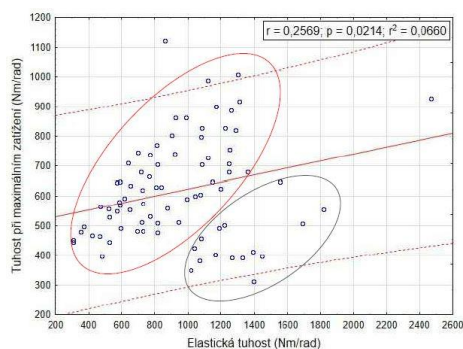
Záborský a kol. (2017) použil ve svých spojích třetinový a poloviční čep (1/3 a 1/2 tloušťky lubu). Rozměrově se tloušťka čepu a průměr kolíků shodovaly (8 a 12 mm). V tabulce 6 je porovnání průměrných dosažených hodnot elastické tuhosti rohových kolíkových spojů testovaných v této práci a rohových spojů s čepem a dlabem z výzkumu Záborského a kol. (2017). Typ namáhání, rozměry spojovacího prostředku a typ lepidla se shodovaly. Záborský pracoval se vzorky z bukového a smrkového dřeva. V tabulce jsou uvedeny výsledky pouze u skupin vzorků z bukového dřeva.

Tabulka 6 Porovnání výsledků se Záborským a kol. (2017).

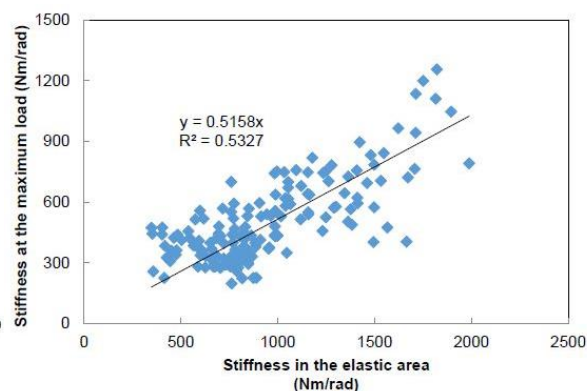
Typ namáhání	Tloušťka čepu (průměr kolíků), (mm)	Typ lepidla	Elastická tuhost (Nm/rad)	Elastická tuhost (Nm/rad) Záborský a kol. (2017)
Tlak	8	PVAc	546	952
Tlak	12	PVAc	1148	1477
Tlak	8	PUR	724	677
Tlak	12	PUR	1174	1365
Tah	8	PVAc	867	1021
Tah	12	PVAc	1287	1627
Tah	8	PUR	685	608
Tah	12	PUR	1093	998

Ve výsledcích můžeme pozorovat, že nejvýraznější vliv na elastickou tuhost má obecně tloušťka spojovacího prostředku. Zajímavé jsou výsledky spojů s ohledem na typ použitého lepidla. Čepové spoje lepené PVAc lepidlem ve všech čtyřech případech převyšovaly hodnoty spojů s vlepými kolíky v řádu stovek Nm/rad. V případě použití PUR lepidla dosahovaly čepové spoje vyšších hodnot pouze u jedné skupiny testovaných vzorků (12 mm čep zatěžovaný tlakem). Zajímavé jsou výsledky tahového namáhání spojů s 12 mm kolíky v této práci a spojem s 12 mm čepem. V obou případech vzorky z těchto skupin vykazovaly nejnižší hodnoty elastické tuhosti ze všech skupin se stejným rozměrem spojovacího prostředku. Ve výzkumu Záborský a kol. (2017) zjistil statisticky významný vliv použitého lepidla, kdy spoje lepené PVAc lepidlem dosahovaly vyšších hodnot elastické tuhosti. Spoje lepené PVAc lepidlem v této práci vykazovaly taktéž lepší výsledky, ale vliv byl statisticky nevýznamný.

Ve výzkumu Záborský a kol. (2017) zkoumal mimo jiné vztah mezi elastickou tuhostí a tuhostí při maximálním zatížení (viz graf 24). Z hodnoty koeficientu determinace R^2 můžeme zjistit korelační koeficient $R = 0,7298$, který ukazuje relativně vysokou míru lineární závislosti.



Graf 3 Vztah mezi elastickou tuhostí a tuhostí při maximálním zatížení.



Graf 24 Vztah mezi elastickou tuhostí a tuhostí při maximálním zatížení (Záborský a kol., 2017).

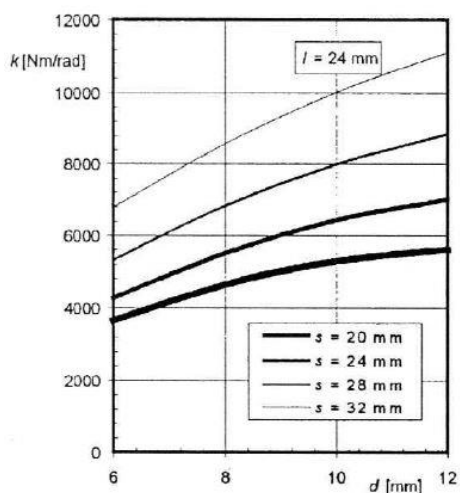
Závislost elastické tuhosti na tuhosti při maximálním zatížení spojů testovaných v této práci je menší. Korelační koeficient dosahuje hodnoty pouze $R = 0,2569$, který značí velmi malou lineární závislost. Je také vidět velký rozptyl hodnot a výskyt extrémů.

Výzkumu kolíkových spojů se věnoval Eckelman (1979), který zjišťoval pevnost a tuhost spoje v úhlové rovině na plocho. Ve výzkumu použil středový spoj prutů, které byly spojeny na tupo pomocí dvou vlepených kolíků. Ve své práci testoval vliv těsnosti spojení (resp. vliv mezery) mezi spojovanými dílci a vliv tloušťky styčného ramene.

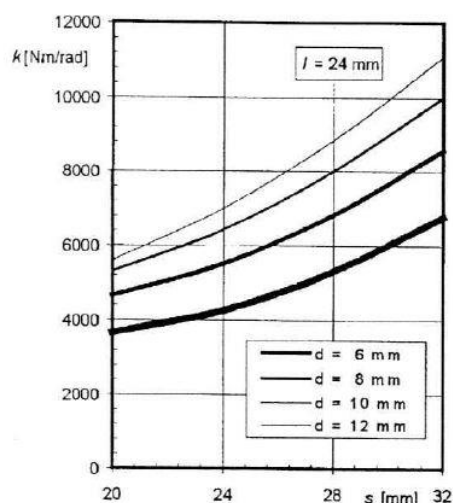
Eckelman (1979) ve svém výzkumu zjistil významný vliv vzájemné těsnosti obou dílců. Mezera mezi dílci (cca 1,5mm) způsobovala rapidní snížení pevnosti a tuhosti celého spoje. Dále zjistil nárůst pevnosti a tuhosti spoje při zvětšování tloušťky styčného ramene.

Pro porovnání provedl také zatěžování spojů v úhlové rovině bokem (T-spoj se stejnými rozměry dílců), které vykazovaly zhruba trojnásobnou pevnost. Větší pevnost byla vzhledem ke geometrii očekávatelná.

Rohovým spojům s vlepenými kolíky se věnovali také Warmbier a Wilczyński (2000), kteří však zatěžovali spoje také v úhlové rovině bokem. K výzkumu použili bukové dřevo a rýhované bukové kolíky, které byly lepené PVAc lepidlem. Elastická tuhost spojů byla vyhodnocena, stejně jako v této práci, z oblasti mezi 10 a 40 % z maximální zatěžovací síly. Ve svém výzkumu sledovali Warmbier a Wilczyński (2000) tři faktory: průměr kolíků, délku zapuštění kolíků a rozteč kolíků.



Graf 25 Vliv průměru kolíku na tuhost (Warmbier a Wilczyński, 2000).



Graf 26 Vliv rozteče kolíků na tuhost (Warmbier a Wilczyński, 2000).

Ve výzkumu byl zjištěn jednoznačný vliv tloušťky kolíku na elastickou tuhost (graf 25). Nejvýraznější vliv na elastickou tuhost měla rozteč kolíků (graf 26). Tento fakt je vzhledem ke způsobu zatěžování pochopitelný. Kolíky se s vyšší roztečí posouvaly více ke krajům, kde je největší tahové a tlakové napětí při zatěžování. Elastickou tuhost nejvíce ovlivňovala výše zmíněná rozteč, dále průměr kolíků a nejméně byla ovlivněna hloubkou zapuštění do dílců (délka zapuštění byla v obou dílcích stejná).

Porovnáním s výsledky v této práci lze konstatovat, že průměr kolíků má významný vliv na tuhost a pevnost spoje při namáhání v úhlové rovině na plocho i v úhlové rovině bokem.

7 Závěr

Cílem výzkumu, kterému se věnuje tato diplomová práce, bylo posouzení vlivu vybraných faktorů – typu namáhání, typu lepidla, průměru spojovacích kolíků a úhlu letokruhů na elastickou tuhost rohového nábytkového spoje. Jednalo se o prostorový kolíkový spoj z bukového dřeva imitující spojení lubů se sloupkem. Dalším cílem bylo provést simulaci zatěžování a výsledky simulace porovnat s výsledky experimentálního měření.

Rohové spoje byly spojeny pomocí standardních bukových kolíků. Pro porovnání byly zvoleny kolíky o průměru 8 a 12 mm, které byly fixovány pomocí dvou typů lepidel. Jednalo se o disperzní polyvinylacetátové a jednosložkové polyuretanové lepidlo. Připravené vzorky byly během zkoušky podrobeny tahovému a tlakovému namáhání v úhlové rovině. Během zkoušky se vzorky zařazovaly do tří skupin podle úhlu letokruhů na čelní straně sloupku.

Po zpracování naměřených dat se vyhodnocovaly vlivy jednotlivých faktorů na elastickou tuhost spoje. Největší vliv na elastickou tuhost vykazovaly spoje s 12 mm kolíky. Použitím kolíků s větším průměrem bylo dosaženo zvýšení elastické tuhosti o 66 %. Ostatní zkoumané faktory neměly samostatně na elastickou tuhost statisticky významný vliv. Kombinací faktorů, konkrétně typu lepidla a typu namáhání, se však dosáhlo u spojů lepených PVAc lepidlem vyšší elastické tuhosti při tahovém namáhání oproti tlakovému. Rozdíl činil zhruba 27 % a tento vliv byl vyhodnocen jako statisticky významný. Další kombinace faktorů byly vyhodnoceny jako nevýznamné.

Pro porovnání experimentálních výsledků byla vytvořena simulace deformace a průběhu napětí. Hodnoty simulované deformace byly porovnány s pracovními diagramy průběhu reálných zkoušek. Při klasickém průběhu, podobnému obecnému pracovnímu diagramu zatěžování dřeva, se reálná deformace blížila hodnotě deformace simulované. Některé grafy průběhu zkoušek vykazovaly atypický průběh s prudkými propady sil nebo velkými nárůsty deformace. Tyto jevy mohly být způsobeny nutností dovyvrtat konstrukční otvory pro kolíky ještě před slepením. Jako nejpravděpodobnější možnost vzniku

této nutnosti bylo broušené ostří vrtacího nástroje nebo zvýšená vlhkost dřeva při opracování.

Poznatky z výsledků této práce je možné přenést do praktického využití. Je třeba konstatovat, že velmi důležitým předpokladem vytvoření dostatečně tuhého spoje, je kvalitní příprava samotného materiálu, která hraje ve výsledku velkou roli. Jednoznačným doporučením pro tvorbu nábytkových kolíkových spojů masivního dřeva je použití kolíků s větším průměrem, což potvrzují i výzkumy jiných autorů.

8 Seznam literatury a použitých zdrojů

Literatura

- BUDÍKOVÁ, Marie; KRÁLOVÁ, Maria; MAROŠ, Bohumil. *Průvodce základními statistickými metodami*. Praha: Grada, 2010. Expert (Grada). 270 s. ISBN 978-80-247-3243-5.
- DAVID, Stanislav; KRATOCHVÍL, Karel. *Materiály pro 2. ročník SPŠ dřevařských*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986. 141 s.
- DINWOODIE, J. *Timber, its nature and behaviour*. 2nd ed. England: BRE, with the support of the Centre for Timber Technology and Construction at BRE, 2000. 258 s. ISBN 0419235809.
- DRÁPELA, Jindřich; HUMPOLEC, Jan; KAMENICKÝ, Ján; KONEČNÝ, Libor; PAVLICA, Jan; RÁŽEK, Václav; ZAPLETAL, Jan. *Výroba nábytku: technologie*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980. 488 s.
- EISNER, Karel; OSTEN, Miloš; HAVLÍČEK, Vladimír. *Dřevo a plasty*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983. 384 s.
- FREIBAUER, Martin; VLÁČILOVÁ, Hana; VILÍMKOVÁ, Milena. *Základy práce v CAD systému SolidWorks*. 2. aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2010. 326 s. ISBN 9788025125045.
- GANDELOVÁ, Libuše; HORÁČEK, Petr; ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila. *Nauka o dřevě*. 3. vyd. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. 175 s. ISBN 978-80-7375-312-2.
- HALABALA, Jindřich. *Výroba nábytku: Tvorba a konstrukce*. 3. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982. 316 s.
- HORÁČEK, Petr. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. 2. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.
- JOSTEN, Elmar; REICHE, Thomas; WITTCHEN, Bernd. *Truhlářské konstrukce: spoje, povrchové úpravy dřeva, konstrukce*. Praha: Grada, 2011. 288 s. ISBN 978-80-247-2960-2.
- JOŠČÁK, Pavol. *Pevnostne navrhovanie nábytku*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1999. 246 s. ISBN 80-228-0921-7.
- JOŠČÁK, Pavol; DUDAS, Juraj; GÁBORÍK, Jozef; GAFF, Milan; LANGOVÁ, Naděžda; NAVRÁTIL, Vojtěch; SLABEJDOVÁ, Gabriela. *Konštrukcia nábytku z dreva a drevných materiálov*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2014. 366 s. ISBN: 978-80-228-2465-1.

JOŠČÁK, Pavol; GAFF, Milan; LANGOVÁ, Naděžda: *Nábytkové konstrukčné spoje*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011. 163 s. ISBN 978-80-228-2255-8

KAZDA, Ivo. *Numerické modelování metodou konečných prvků*. Praha: České vysoké učení technické, 1995. 62 s. ISBN 8001013219.

KOLÁŘ, Vladimír; NĚMEC, Ivan; KANICKÝ, Viktor. *FEM: principy a praxe metody konečných prvků*. Praha: Computer Press, 1997. 400 s. ISBN 8072260219.

LENERT, Jiří. *Úvod do metody konečných prvků*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1999. 110 s. ISBN 8070786868.

LIKEŠ, Jiří; CYHELSKÝ, Lubomír; HINDLS, Richard. *Úvod do statistiky a pravděpodobnosti: statistika A*. Praha: Vysoká škola ekonomická, 1993. 170 s. ISBN 8070790288.

LYSÝ, František; JÍRŮ, Pavel. *Nauka o dřevě*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954. 758 s.

MUZIKÁŘ, Zdeněk; TESAŘOVÁ, Daniela; HOLOUŠ, Zdeněk; JERGL, Zdeněk; MELOUN, Milan. *Materiály II: pro UO Truhlář*. Praha: Informatorium, 2008. 172 s. ISBN 978-80-7333-061-3.

NEMEC, Lubomír; ZEMIAR, Ján; ŠULÁN, Elemír. *Technológia výroby nábytku*. Bratislava: Alfa, 1986. 515 s.

NOVÁK, Vladimír. *Dřevařská technická příručka*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury 1970. 743 s.

NUTSCH, Wolfgang. *Konstrukce nábytku: nábytek a zabudované skříně*. Praha: Grada, 2003. 400 s. ISBN 80-247-0220-7.

NUTSCH, Wolfgang. *Konstrukce nábytku: nábytek a zabudované skříně*. 2. vyd. Praha: Grada, 2012. 408 s. ISBN 9788024742441.

POŽGAJ, Alexander; CHOVANEC, Dušan; KURJATKO, Stanislav; BABIAK, Marián. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2.vyd. Bratislava: Príroda, 1997. 485 s. ISBN: 80-07-00960-4.

POŽIVIL, Jaroslav; VANĚK, Tomáš; BERNAUER, Bohumil. *Procesní systémové inženýrství*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1997. 219 s. ISBN 8070803118.

ŘEZANKOVÁ, Hana; LÖSTER, Tomáš. *Základy statistiky*. Praha: Oeconomica, 2013. 95 s. ISBN 9788024519579.

ŠPANIEL, Miroslav; HORÁK, Zdeněk. *Úvod do metody konečných prvků*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2011. 158 s. ISBN 9788001046654.

TRÁVNÍK, Arnošt. *Výroba dřevěného nábytku*. 2. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2003. 217 s. ISBN 80-7157-674-3.

TRÁVNÍK, Arnošt; SVOBODA, Jaroslav. *Technologické procesy výroby nábytku*. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2007. 222 s. ISBN 978-80-7375-056-5.

UHLÍŘ, Alois. *Technologie výroby nábytku II pro 3. ročník studijního oboru Nábytkářství*. 2. vyd. Praha: Informatorium, 1997. 255 s. ISBN 80-86073-09-2.

ZEMIAR, Ján; GÁBORÍK, Jozef; MUZIKÁŘ, Zdeněk; NAVRÁTIL, Vojtěch; RUŽIŇSKÁ, Eva; ŠEBO, Norbert. *Technológia výroby nábytku*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. 287 s. ISBN 978-80-228-2064-6

Internetové zdroje

DERIKVAND, M.; ECKELMAN, C. A. Bending moment capacity of L-shaped mitered frame joints constructed of MDF and particleboard. *BioResources* [online]. 2015, 10 (3) [cit. 2017-03-28]. Dostupné z WWW: http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_10_3_5677_Derikvand_and_Bending_Moment_Capacity_Frame_Joints

DIACONU, D.; WASSENBERG, M.; SPIECKER, H. Variability of European beech wood density as influenced by interactions between tree-ring growth and aspect. *Forest Ecosystems* [online]. 2016 (7) [cit. 2017-04-12]. Dostupné z WWW: <https://forestecosyst.springeropen.com/articles/10.1186/s40663-016-0065-8>

DREVARI.SK. *Myšlienka Hoffmannových rybiniek* [online]. 2010 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z WWW: <http://www.drevari.sk/cl3052/My%C5%A1lienka-Hoffmannov%C3%BDch-rybiniek>

ECKELMAN, C. A. Out-of-plane strength and stiffness of dowel joints. *Forest Products Journal* [online]. 1979 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z WWW: <https://www.agriculture.purdue.edu/fnr/faculty/eckelman/documents/d197908.pdf>

EPIMEX.SK. *Hoffmannove spoje* [online]. 2012 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z WWW: <http://www.epimex.sk/index.php/novestroje-2/systemypajaniahoffman/hoffmannove-spoje/specialne-spojky>

FESTOOL.CZ. *Domino_DF* [online]. 2005 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z WWW: http://c.pk-festool.cz/files/pdf/Domino_DF%20500.pdf

FUSEK, Martin; HALAMA, Radim. *MKP a MHP* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava a Západočeská univerzita v Plzni, 2011 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z WWW: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_a_hranic_nich_prvku.pdf

- HAEFELE.DE. *Verbinder hojmann schwalbe* [online]. 2017 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z WWW: <https://www.haeefe.de/de/produkt/verbinder-hoffmann-schwalbe-w2/0000005c0002c73d00010023/>
- HAJDAREVIC, S.; IBRAHIM, B. Stiffness analysis of wooden chair frame. *Procedia Engineering* [online]. 2015 (100) [cit. 2017-04-01]. Dostupné z WWW:
- JIVKOV, V.; MARINOVA, A.; PETUTSCHNIGG, A. J. Influence of the temperature on the bending strength and stiffness characteristics of glued corner joints of frame structural elements made from solid beech wood. *Nábytok 2008* [online]. 2008 [cit. 2017-04-1]. Dostupné z WWW: http://www.academia.edu/21755274/Influence_of_the_Temperature_on_the_Bending_Strength_and_Stiffness_Characteristics_of_Glued_Corner_Joints_of_Frame_Structural_Elements_Made_From_Solid_Beech_Wood
- KAMPERIDOU, V.; VASILEIOU, V. Bending capacity of middle joints of upholstered furniture frames. *Drvna industrija* [online]. 2012, 63(4) [cit. 2017-03-28]. Dostupné z WWW: file:///C:/Users/jakub/Downloads/Drv_Ind_Vol_63_4_Kamperidou.pdf
- KASAL, A.; KUSKUN, T.; HAVIAROVA, E.; ERDIL, Y. Z. Static front to back loading capacity of wooden chairs and relationship between chair strength and individual joint strength. *BioResources* [online]. 2016b, 11 (4) [cit. 2017-04-08]. Dostupné z WWW: http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_11_4_9359_Kasal_Static_Front_Back>Loading_Capacity/4805
- KASAL, A.; SMARDZEWSKI, J.; KUSKUN, T.; ERDIL, Y. Z. Numerical analyses of various sizes of mortise and tenon furniture joints. *BioResources* [online]. 2016a, 11 (3) [cit. 2017-03-20]. Dostupné z WWW: http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_11_3_6836_Kasal_Numerical_Analyses_Mortise_Tenon/4600
- NANDANWAR, A.; NAIDU, M. V.; PANDEY, C. N. Development of test methods for wooden furniture joints. *Wood Materials Science & Engineering*
- PODLENA, M.; BORŮVKA, V. Stiffness coefficients of mortise and tenon joints used on wooden window profiles. *BioResources* [online]. 2016, 11 (2) [cit. 2017-03-20]. Dostupné z WWW: http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_11_2_4677_Podlena_Stiffness_Coefficients_Mortise_Tenon
- PUBLI.CZ. *Konstruční spoje* [online]. 2017 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z WWW: <https://publi.cz/books/163/10.html>
- SMARDZEWSKI, J.; PAPUGA, T. Stress distribution in angle joints of skeleton furniture. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities* [online]. 2004 (7) [cit. 2017-04-12]. Dostupné z WWW: <http://www.ejpau.media.pl/volume7/issue1/wood/art-05.html>

SOLIDWORKS.CZ. *Balíčky SOLIDWORKS Simulation* [online]. 2014 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z WWW: <http://www.solidworks.cz/produkty/simulace/balicky/>

STATSOFT.CZ. *Nebojte se p-hodnot* [online]. 2014b [cit. 2017-03-09]. Dostupné z WWW:

http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2014_06_26_StatSoft_Nebojte_se_p-hodnot.pdf

STATSOFT.CZ. *Stručný manuál STATISTICA* [online]. 2014a [cit. 2017-03-09]. Dostupné z WWW:

<http://www.statsoft.cz/file1/PDF/StrucnyManualSTATISTICA.pdf>

STATSOFT.CZ. *Úvod do regresní analýzy* [online]. 2014c [cit. 2017-03-09]. Dostupné z WWW:

http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2014_26_03_StatSoft_Uvod_do_regr-esni_analyzy.pdf

UYSAL, M.; HAVIAROVA, E.; ECKELMAN, C. A. A comparison of the cyclic durability, ease of disassembly, repair, and reuse of parts of wooden chair frames. *Materials and Design* [online]. 2015, 87 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z WWW: https://www.researchgate.net/publication/282624114_A_Comparison_of_the_Cyclic_Durability_Ease_of_Disassembly_Repair_and_Reuse_of_Parts_of_Wooden_Chair_Frames

VASSILIOU, Vassilios; BARBOUTIS, Ioannis. Strength of furniture joints constructed with biscuits. *Nábytok 2008* [online]. 2008 [cit. 2017-03-20].

Dostupné z WWW:

<http://users.auth.gr/jbarb/Publications/ZVOLEN%2008%20STRENGTH%20OF%20FURNITURE%20JOINTS%20CONSTRUCTED%20WITH.pdf>

WARMBIER, K.; WILCZYŃSKI, A. Strength and stiffness of dowel corner joints – effect of joint dimensions. *Folia Forestalia Polonica* [online]. 2000, 31 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z WWW:

<http://www.ffp.au.poznan.pl/pdf/31/Folia%20Forestalia%20Pol%2031-3%20Warmbier%20Wilczynski.pdf>

ZÁBORSKÝ, V.; BORŮVKA, V.; RUMAN, D.; GAFF, M. Effects of geometric parameters of structural elements on joint stiffness. *BioResources* [online]. 2017, 12(1) [cit. 2017-3-27]. Dostupné z WWW:

http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_12_1_932_Zaborsky_Geometric_Parameters_Structural_Elements

ZEIDLER, Aleš. *Lexikon dřeva* [online]. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012 [cit. 2017-03-12]. Dostupné z WWW:

http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon_dreva/lexikon_dreva.pdf

Normy

ČSN 49 0103. *Drevo. Zisťovanie hustoty*. Praha: Český normalizační institut, 1993.

ČSN 49 0108. *Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach*. Praha: Český normalizační institut, 1979.

ČSN 91 0100. *Nábytek – Bezpečnostní požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2006.

ČSN EN 942. *Dřevo na truhlářské výrobky - Všeobecné požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2007.