

**Mendelova univerzita v Brně
Lesnická a dřevařská fakulta**

Ústav nábytku, designu a bydlení

**Vliv pojivové báze lepidla a druhu lepeného spoje na pevnost
lepeného spoje masivního dřeva akátu**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: **Vliv pojivové báze lepidla a druhu lepeného spoje na pevnost lepeného spoje masivního dřeva akátu** vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne:

.....

Podpis

Poděkování

Mé poděkování za odborné vedení, cenné rady a pomoc patří především vedoucí mé bakalářské práce paní doc. Ing. Daniele Tesařové, Ph.D. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Josefu Hlavatému, Ph.D. za pomoc při provádění zkoušek a v neposlední řadě panu Ing. Josefu Stehlíkovi z firmy KOMPAN Czech Republic s.r.o. za zprostředkování přípravy materiálu na zkušební vzorky.

Abstrakt

Jméno: Pavel Stehlík

Název bakalářské práce: Vliv pojivové báze lepidla a druhu lepeného spoje na pevnost lepeného spoje masivního dřeva akátu

Bakalářská práce se zabývá vlivem pojivové báze lepidla a typu použitého spoje na pevnost spoje. Testováno bylo dřevo trnovníku akátu (*Robinia pseudoacacia L.*), a to v šířkovém napojení na profilovou spáru (ozub) a na tupou spáru. Lepení bylo provedeno jednosložkovým lepidlem na bázi polyuretanu a roztokovým lepidlem na bázi roztoku polyvinylacetátu v organických rozpouštědlech. Spoje byly klimatizovány za normálních podmínek a testovány z hlediska pevnosti tahovou zkouškou.

Klíčová slova:

Lepené spoje, pevnost v tahu, profilová spára, trnovník akát, tupá spára

Abstract

Name: Pavel Stehlik

Name of the bachelor's thesis: The effect of a glue basis and a type of wood joint on the bond strength of robinia solid wood bonded joints

This bachelor's thesis deals with the effect of a glue basis and a type of selected wood joint on the bond strength. The test was carried out on the solid robinia wood specimens which were joined in width using either finger or edge joint. The specimens were glued together with one component polyurethane adhesive or contact polyvinyl acetate adhesive. Selected joints were conditioned under normal conditions and later tested for tensile test.

Key words: Bonded joints, tensile strength, finger joint, robinia, edge joint

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Cíl práce.....	10
3. Literární přehled	11
3.1. Rozdělení lepidel	11
3.1.1. Podle původu	11
3.1.2. Podle způsobu tvorby filmu.....	12
3.1.3. Podle vodovzdornosti	14
3.2. Faktory ovlivňující pevnost lepeného spoje	14
3.2.1. Výběr a požadavky na lepidlo	14
3.2.2. Vliv působení vody.....	15
3.2.3. Mechanické vlastnosti spoje.....	15
3.2.4. Vady lepených spojů.....	16
3.3. Polyuretanová lepidla	17
3.4. Polyvinylacetátová lepidla.....	18
4. Použité stroje, pomůcky, materiál a zkušební metody.....	19
4.1. Použitý materiál	19
4.1.1. Materiál použitý na výrobu vzorků.....	19
4.1.2. Použitá lepidla.....	20
4.1.3. Použité typy spojů.....	21
4.2. Použité stroje, přístroje a pomůcky.....	22
4.2.1. Stroje a pomůcky použité k výrobě vzorků	22
4.2.2. Přístroje a pomůcky použité k laboratorní zkoušce	22
4.3. Postup při řešení bakalářské práce.....	23
4.3.1. Výroba zkušebních vzorků	23
4.3.2. Výroba a příprava zkušebních těles	23

4.3.3. Postup zkoušky	24
5. Výsledky laboratorního zkoušení	25
6. Diskuze	43
7. Závěr	46
8. Summary.....	47
9. Použitá literatura	48
10. Seznam zkratk	50
11. Seznam tabulek	51
12. Seznam obrázků.....	52
13. Přílohy.....	54

1. Úvod

Spojování materiálů pomocí lepení, jako způsob nedemontovatelného spoje, se používá již řadu let. Avšak teprve s vývojem nových, kvalitních lepidel je tento způsob spojování možné využít v různých odvětvích průmyslu. Zejména v oblasti výroby nábytku nebo jiných dřevěných výrobků je lepidlo, jako spojovací materiál, velmi hojně využíváno. Existuje široká škála lepidel s různými vlastnostmi a oblastmi použití. Pro nábytkářský průmysl jsou velkým přínosem lepidla, která dala vzniknout velkoplošným aglomerovaným materiálům. Díky těmto materiálům je možné zpracovat jinak nepoužitelné sortimenty dřeva. Výhoda velkoplošných materiálů oproti masivnímu dřevu spočívá mimo jiné ve stejnorodosti, izotropním charakteru, výtěžnosti a mnohdy i lepších mechanických vlastnostech. Lepidla mají své uplatnění také při samotné výrobě nábytku.

Druhá široká oblast použití je lepení masivního dřeva pomocí rozličných konstrukčních spojů. Toho se využívá u stavebně-truhlářských výrobků, jako jsou okna, dveře, dělicí příčky či obložení stěn, nebo u výrobků určených do exteriéru. Do této skupiny patří mimo jiné dřevěné terasy, obklady fasád, zahradní nábytek nebo konstrukce na dětská hřiště. U těchto typů výrobků je nutné brát v úvahu namáhání spojů. V exteriéru je to působení vody či vzdušné vlhkosti, změny teplot, ale také mechanické namáhání. Odolnost vůči mechanickému namáhání je důležitá zejména u těch výrobků, které jsou často používány a opakovaně dynamicky zatěžovány, například zahradní nábytek či konstrukce použité na dětských hřištích. Právě zde je z hlediska bezpečnosti nutné zvolit vhodnou kombinaci konstrukčního spoje a lepidla.

2. Cíl práce

Cílem práce je porovnat pevnost lepených spojů na tupou spáru a na profilovou spáru u dřeva trnovníku akátu. Vzorčky byly lepeny jednosložkovým lepidlem na bázi polyuretanu a roztokovým lepidlem na bázi roztoku polyvinylacetátu v organických rozpouštědlech. Spoje byly klimatizovány za normálních podmínek a testovány z hlediska pevnosti tahovou zkouškou.

Hlavním úkolem této práce je porovnat:

- pevnost ve smyku v tahu mezi spojem na tupou spáru a na profilovou spáru
- pevnost ve smyku v tahu mezi spoji lepenými polyuretanovým a polyvinylacetátovým lepidlem
- vliv radiálního a tangenciálního směru průběhu letokruhů na pevnost spoje

3. Literární přehled

3.1. Rozdělení lepidel

Lepidla je možné dělit podle několika hledisek. Obvyklé je dělení podle původu, pojivové báze, způsobu zpracování nebo způsobu vytvrzování. Ovšem skupina lepidel je velmi rozsáhlá a nelze vytvořit jednotný způsob dělení, který by vystihoval jejich vlastnosti. Rozlišení je tedy možné také například podle obsahu rozpouštědel, odolnosti vůči působení vody, konzistence, účelu lepení a podobně.

3.1.1. Podle původu

Podle původu je možné lepidla rozdělit do tří skupin, a to na lepidla z přírodních surovin, lepidla minerální a lepidla syntetická. Se stále rostoucími možnostmi výroby a požadavky na lepidla jsou přírodní lepidla na ústupu a více rozšířena jsou lepidla syntetická.

3.1.1.1. Lepidla z přírodních surovin

Mezi lepidla z přírodních surovin se zařazují lepidla živočišného a rostlinného původu. Lepidla živočišného původu se vyrábí z částí těl zvířat (kosti a kůže), krve nebo z jejich produktů (mléko). Zařazujeme sem lepidla glutinová, kaseinová a albuminová.

K výrobě lepidel rostlinného původu se využívají makromolekulární látky, jako jsou bílkoviny, škrob, celulóza, pektiny, rostlinné gumy a další. Tyto látky lze převést na koloidní nebo viskózní roztoky mající adhezivní vlastnosti. Mezi lepidla rostlinného původu patří lepidla škrobová nebo pektinová, ale také lepidla z derivátů celulózy, kaučuková a další. (Liptáková, Sedliačik, 1989)

3.1.1.2. Minerální lepidla

Jako lepidla minerální jsou označována ve vodě rozpustná lepidla z anorganických surovin. Zařazujeme sem vodní sklo, sádro a cement. Vodní sklo může být použito na výrobu transportních obalů, neboť se na vzduchu rozpadává a pevnost spoje vydrží krátký čas. Některé typy cementů jsou používány na výrobu nehořlavých cementotřískových desek, sádra je zase využívána k výrobě sádrokartonových desek. (Sedliačik, 1998; Osten, 1975)

3.1.1.3. Syntetická lepidla

Lepidla z přírodních zdrojů jsou již dlouhou dobu nahrazována lepidly syntetickými. Ta v současnosti tvoří skupinu nejvýznamnějších a nejvíce používaných lepidel v dřevařském a nábytkářském průmyslu. Syntetická lepidla mají lepší vlastnosti, vytváří pevnější a odolnější spoj.

Díky vývoji a zdokonalování nových typů lepidel mohou být vyvíjeny nové materiály, které dávají vzniknout novým výrobkům. Mezi tyto materiály patří například aglomerované třískové a vláknité desky nebo různé typy kompozitů. Jejich výhoda spočívá především v efektivním využití dřevního odpadu, lepších mechanických vlastnostech a v odolnosti vůči působení nepříznivých vlivů.

Syntetická lepidla se rozdělují podle tvaru makromolekul, způsobu zesíťování polymerů a s tím souvisejících vlastností. Do skupiny termosetických lepidel patří močovinoformaldehydová, melaminformaldehydová, fenolformaldehydová, rezorcinolformaldehydová, epoxidová, izokyanátová a polyesterová. Termoplastická lepidla jsou vinylová, akrylátová a lepidla na bázi derivátů celulózy. (Sedliačik, Sedliačik, 1998)

3.1.2. Podle způsobu tvorby filmu

3.1.2.4. Odpařením rozpouštědla

Vytvrzování lepidla odpařením rozpouštědla závisí ve velké míře na struktuře lepeného materiálu. Rozpouštědla musí proniknout póry z lepené spáry do materiálu nebo skrz něj. U lepených povrchů, které jsou málo porézní nebo dokonce zcela bez pórů, může nastat problém. V tomto ohledu je dřevo vhodný materiál, neboť jeho struktura umožňuje rozpouštědlům z lepené spáry unikat, a tak dojde k vytvrzení lepidla. Samozřejmě tato schopnost je také ovlivněna druhem dřeva, anatomickou stavbou nebo jeho vlhkostí.

Vyšší vlhkost znamená více vody obsažené ve dřevě a také nižší schopnost další vodu přijímat. Proto téměř nelze lepit čerstvě pokácené dřevo, neboť je zde velmi málo míst, kam může voda či rozpouštědlo z lepidla pronikat. Na druhou stranu příliš vysušené dřevo není také vhodné, protože jeho povrch je značně hydrofobní a lepidlo obtížně smáčí povrch a pronikání rozpouštědla do materiálů je také omezeno. Proto je pro každé lepidlo stanovena ideální vlhkost lepeného materiálu a obecně se pohybuje mezi 4 a 10 %. (Rowell, 2005)

3.1.2.5. Polymerací – polykondenzací

Pevné spojení zajišťují lépe polymery s vyšší molekulovou hmotností a hustěji zesíťované. Lepidla (složená z monomerů nebo oligomerů) musí být před aplikací stabilní, a proto je po nanesení nutná jejich aktivace. Ta může být provedena pomocí tepla, přidáním další složky, radiací či změnou pH.

Urychlení procesu polymerace je možné zvýšením teploty. Obvykle platí, že zvýšením teploty o každých 10 °C se rychlost reakce zdvojnásobí. Jelikož je ale dřevo dobrý izolant, rovnoměrné zahřívání lepidla může být problém. Toto se týká nejen masivního dřeva, ale také některých kompozitů a laminátů. Nedostatečné zahřátí může mít za důsledek nízkou pevnost vazby z důvodu neúplné tvorby polymeru.

Poměrně širokou skupinu lepidel tvoří lepidla dvousložková. Smícháním obou složek bezprostředně před procesem lepení začne proces polymerace. Lepidlo je nanášeno při normální teplotě, avšak většina reakcí vyžaduje teplotu vyšší. Pro urychlení je tedy lepený soubor umístěn do vyhřívaného lisu, kde je při vysoké teplotě zatěžován tlakem. Naopak příliš vysoká rychlost reakce také není žádaná, neboť v důsledku polymerace klesá viskozita a schopnost lepidla penetrovat do lepeného materiálu se snižuje. (Rowell, 2005)

3.1.2.6. Změnou teploty

Lepení při použití tavných lepidel zahrnuje roztavení lepidla, nanesení na lepený povrch a zchlazení lepidla po přiložení druhého adherendu, čímž vzniká lepený spoj. Nyní jsou některé typy tavných lepidel používány na lepení plastu se dřevem, v nábytkářském průmyslu zejména na olepování bočních ploch dílců, přípravu sesazenek, lepení rohových spojů korpusů na pokos nebo při výrobě oken. Lepení kovů tavnými lepidly může být obtížné. Při kontaktu lepidla s kovem dojde k rychlému odvádění tepla, povrchová vrstva taveniny je ochlazená, lepidlo nedostatečně smáčí lepený povrch a špatně penetruje do adherendu. V důsledku toho vzniká nekvalitní spoj s malou pevností.

Tavná lepidla jsou amorfní polymery a mají omezenou schopnost téci. Proto je potřeba je před použitím zahřát na teplotu nad bodem měknutí, což se pohybuje přibližně mezi 130 až 240 °C. Schopnost téci je možné ovlivnit také typem základního polymeru, tedy jeho molekulovou hmotností a reologickými vlastnostmi. Čím je molekulová hmotnost polymeru menší, tím lépe lepidlo teče. Vlastnosti lepidla lze kromě teploty a typu polymeru ovlivnit také přidáním složkami, jako jsou přírodní

nebo syntetické pryskyřice, parafín, různé oleje a další. Těmito způsoby lze připravit lepidlo s potřebnými vlastnostmi, jako je viskozita taveniny, teplota tání, lepivost či vytvrzovací čas, pokud je potřeba delší čas na stažení dvou lepených dílců k sobě. Po zchladnutí lepidla jeho viskozita prudce vzroste. Ačkoliv je tímto smáčení dřeva velmi omezeno, bylo zjištěno pronikání do lumenů buněk. Zkoumání a pochopení interakce mezi tavnými lepidly a dřevem je důležité pro výrobu pokročilých kompozitů. (Rowell, 2005; Sedliačik, Sedliačik, 1998)

3.1.3. Podle vodovzdornosti

Odolnost lepidel vůči působení vody je stanovena normou. Pro termoplastická lepidla je platná norma ČSN EN 204 a zařazuje tato lepidla do kategorií D1–D4. Obdobně jsou termosetická lepidla zařazena do kategorií C1–C4 dle normy ČSN EN 12765. Každá trvanlivostní třída je charakterizována několika faktory, kterých musí lepený spoj dosáhnout. Označení je nastaveno tak, že se zvyšujícím se číslem roste schopnost odolávat vodě. Trvanlivostní třída musí být na obalu lepidla vyznačena.

Nejlepší vodovzdornosti dosahují obecně lepidla epoxidová nebo resorcinolová, dále fenolformaldehydová a polyuretanová a o něco menší odolnost mají lepidla polyvinylacetátová disperzní. Například u polyvinylacetátových disperzních lepidel existují tužidla, která po smíchání s lepidlem vodovzdornost zvyšují. Odolnost spoje proti vodě ovšem nezávisí pouze na typu použitého lepidla, ale také na lepených materiálech. Savé materiály mohou propustit vodu až do lepené spáry. V tomto případě musí být použito lepidlo s vyšší třídou vodovzdornosti. (Tesařová, 2014)

3.2. Faktory ovlivňující pevnost lepeného spoje

3.2.1. Výběr a požadavky na lepidlo

Při volbě lepidla je potřeba zohlednit druh lepených materiálů, typ lepeného spoje, podmínky, kterým bude spoj vystaven a další. Z hlediska aplikace jsou důležité tyto vlastnosti lepidla: otevřená doba, jednoduchost přípravy, snadné nanášení, krátký čas vytvrzení nebo také zdravotní nezávadnost. Na dynamicky namáhané výrobky je potřeba zvolit lepidla, která tvoří dostatečně pružný spoj, požadavek na pevné spojení zase splňují konstrukční lepidla. Je také nutné zajistit, aby lepená spára nenarušovala estetický vzhled výrobku, nepoškozovala lepený podklad a nereagovala s konečnou povrchovou úpravou. (Tesařová, 2014)

3.2.2. Vliv působení vody

V exteriéru je lepený spoj vystaven jednak mechanickému namáhání (vítr, prach), ale také namáhání způsobenému změnami teplot a působením vody nebo vodní páry. Pokud je výrobek v tomto prostředí umístěn dlouhodobě, změny klimatických podmínek mají na lepidlo nepříznivý vliv. Působením vody může dojít k hydrolýze nebo rozpouštění lepidla. Změny vlhkosti vzduchu také způsobují tvarové změny dřeva. Bobtnání a sesychání adherendu má vliv i na lepenou spáru a toto napětí působí jako dlouhodobé zatížení spoje.

Pro lepený spoj jsou nejméně příznivé opakující se změny vlhkosti, což nastává právě při uložení výrobku v exteriéru. Tyto změny vyvolávají v lepené spáře napětí, které dosahuje cyklického charakteru, a tím je proces destrukce výrazně urychlen. Nezanedbatelný vliv má také charakter lepeného materiálu a jeho rozměry. Pórovité materiály, kterým je také dřevo, umožňují difúzní pronikání vody k lepené spáře více než materiály nepórovité. U všech materiálů však proniká vlhkost k lepidlu přes okraje lepené spáry. (Frejdin, 1988)

Změny, které voda způsobí, mohou být jak reversibilní, tak ireversibilní. Pokud je ztráta pevnosti spoje způsobena plastifikací nebo bobtnáním lepidla či adherendu, nemusí to být z hlediska pevnosti spoje až tak velký problém. Ovšem za předpokladu, že je lepený povrch a materiál kvalitně opracován a připraven, lepidlo je dostatečně odolné vůči působení vody a degradace není příliš velká. V takovém případě není pevnost snížena trvale. Po poklesu vlhkosti může lepený spoj dosahovat téměř stejné pevnosti, jako měl před působením namáhání. Nicméně při opakovaném a dlouhodobém působení vody začnou převažovat změny ireversibilní. Působící voda oslabuje a degraduje rozhraní mezi adherendem a lepidlem, vzrůstající napětí dále spoj poškozují a může dojít až k jeho úplnému selhání. (Custódio, 2009)

3.2.3. Mechanické vlastnosti spoje

Spoj může být namáhán několika typy zatěžováním. Typ namáhání záleží na tom, kde a v jaké konstrukci je použit. Vždy je nutné navrhnout konstrukci tak, aby bylo namáhání rozloženo rovnoměrně a nebylo soustředěno pouze v místě spoje. Zatížení může být statické nebo dynamické, způsobené tíhou dílce nebo opakovanými rázy, průhybem či chvěním. Lepený spoj může být namáhán v tahu, tlaku, krutu, smyku nebo odlupování. Existuje velké množství typů spojů a některé odolávají danému typu

namáhání lépe než jiné. Obecně lze však říci, že namáhání v odlupování je pro spoj nejméně vhodné a je dobré navrhnout spoj tak, aby největší namáhání bylo v tahu nebo ve smyku. (Osten, 1975)

3.2.4. Vady lepených spojů

Výsledná pevnost lepeného spoje závisí na několika faktorech. Vliv má příprava materiálu před lepením, způsob a kvalita nanesení lepicí směsi, doba lisování, podmínky prostředí při lepení a další. Pokud nejsou dodrženy předepsané postupy a podmínky, mohou vzniknout různé vady lepeného spoje.

3.2.4.1. Chudý spoj

Spoj navenek nevykazuje žádné viditelné vady nebo rozlepená místa, avšak k jeho porušení je zapotřebí velmi malé síly. Lepidlo příliš penetruje do vrstvy lepeného materiálu a ve spoji se tak nevytvoří dostatečně pevný a souvislý film. V důsledku toho dojde k porušení právě ve vrstvě lepidla a materiál v okolí lepeného spoje zůstává neporušen. Příčinou může být velká pórovitost dřeva, nadměrná vlhkost, malý nános lepidla nebo příliš velký lisovací tlak, kterým se lepidlo zatlačí do dřeva nebo vytlačí z lepeného spoje.

3.2.4.2. Rozlepený spoj

Ve spoji jsou viditelné spáry nebo mezery. To zapříčiní malou pevnost, protože k sobě lepené povrchy dostatečně nedoléhají. Toto může být způsobeno například špatným opracováním povrchu, kdy je povrch natolik hrubý, že makroskopické nerovnosti nedovolí lepeným povrchům k sobě dostatečně dosednout.

3.2.4.3. Zrnitý spoj

Spoj je málo pevný a po rozlepení má povrch lepidla zrnitou, krupicovitou strukturu. Tato vada je nejčastěji způsobena špatnou přípravou lepicí směsi, kdy je použit příliš velký podíl nastavovadla nebo plniva, popřípadě není směs řádně promíchána. Důvodem může být též použití nevhodného nastavovadla, což způsobí nemožnost vsáknutí lepidla do lepeného materiálu.

3.2.4.4. Zamrzlý spoj

Tento typ chybného spoje se vyskytuje zejména při jednostranném nánosu – tedy při nanášení lepidla pouze na jeden z lepených povrchů. Na této ploše lze po rozlepení spoje vidět souvislou vrstvu lepidla, která je dobře zakotvená do podkladu, avšak druhá

z lepených ploch je bez stop po lepidle. Je to způsobeno tím, že vrstva lepidla vytvrde dřívě, než jsou oba povrchy slisovány k sobě.

3.2.4.5. Nezakotvený spoj

Ve spáře je film lepidla sice souvislý, ale není kvalitně zakotven v lepeném povrchu. Lepidlo nemůže dostatečně zakotvit, pokud není povrch očištěn od prachu nebo mastnoty. Dalším důvodem může být vysoká viskozita lepidla, nevhodná vlhkost lepeného materiálu nebo předčasné vytvrzení vrstvy lepidla.

3.2.4.6. Zdánlivě pevný spoj

Lepený spoj má malou pevnost a porušení nastává ve vrstvě dřeva v blízkosti filmu lepidla. Po rozlepení je na lepidle patrná vrstva jemných vláken. Příčinou může být nevhodné či nekvalitní opracování lepeného povrchu, povrch napadený dřevokaznými houbami nebo hnilobou, ale také narušení pevnosti dřeva lepidlem.

3.2.4.7. Ostatní chyby

Nedodržením správného postupu při lepení nebo použitím nevhodných lepidel pro daný účel a materiál mohou vzniknout rozličné vady, což může ve výsledku vést až ke znehodnocení výrobku. Deformace lepených výrobků může být způsobena lepením dvou dílců z odlišných druhů dřev, dílců s nestejnou vlhkostí nebo nesouměrnou skladbou vrstvených materiálů. Zabarvení výrobků může způsobit chemické složení lepidla, prosáknutí lepidla skrz lepený materiál (například dýhu) nebo styk lepidla či lepených částí s kovovými přípravky nebo deskami lisu. (Liptáková, Sedliačik, 1989)

3.3. Polyuretanová lepidla

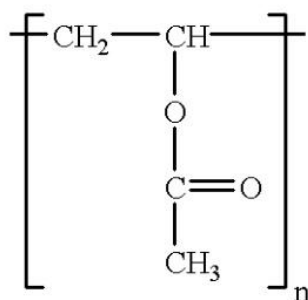
Lepidla na bázi polyuretanu mohou být, v závislosti na oblasti použití, jednosložková nebo dvousložková. Nízká viskozita lepidla může být zajištěna nízkou molekulovou hmotností složek nebo přidáním rozpouštědel, která viskozitu sníží. Jako ředidlo se však nesmí použít alkoholy, neboť reagují s izokyanáty za vzniku derivátů močoviny.

K vytvrzení jednosložkových polyuretanů stačí pouze vlhkost dřeva nebo vzdušná vlhkost. Izokyanátové skupiny reagují s vodou za vzniku aminů, které dále reagují opět s izokyanátovými skupinami a způsobují zesítnění (viz obr. 2). Dvousložková polyuretanová lepidla vytvrzují po smíchání obou složek dohromady. K docílení pevného spoje je důležité kvalitní promíchání obou složek. (Rowell, 2005)

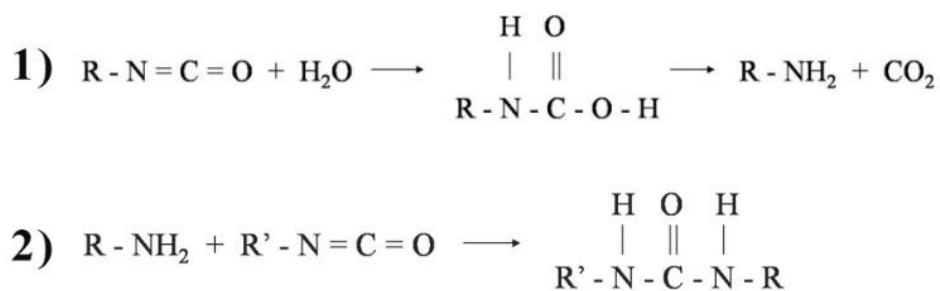
Výhodou polyuretanových lepidel je jejich odolnost vůči povětrnostním vlivům a dynamickému namáhání. Hodí se tedy pro lepení výrobků určených do exteriéru. K dalším výhodám patří poměrně krátká doba vytvrzování (90–120 s) a také poměrně velká smyková pevnost dosahující až 23 MPa. Mezi nevýhody může naopak patřit jejich toxicita, protože obsahují škodlivá rozpouštědla. Oblast použití polyuretanových lepidel je poměrně široká. Můžeme jimi lepit dřevo, kov, některé druhy plastů, ale také umělé kůže nebo kaučuk. (Tesařová, 2014)

3.4. Polyvinylacetátová lepidla

Polyvinylacetátová lepidla se vyznačují dobrou přilnavostí ke dřevu z důvodu jejich polárního charakteru. V nábytkářském průmyslu jsou velmi rozšířená, zejména ve formě vodou ředitelných disperzí. K přednostem PVAc disperzí patří pevné a pružné spoje, nehořlavost a odolnost vůči mikroorganismům. Bez úprav je toto lepidlo málo odolné vůči vodě, avšak tuto odolnost lze zvýšit například přimícháním tužidla. Po vytvrzení lepidlo vytvoří bezbarvý spoj, proto se v nábytkářském průmyslu používá převážně pro montážní lepení, kolíkové spoje, lepení spárovek nebo dýchování. Nejvíce rozšířená jsou polyvinylacetátová disperzní vodou ředitelná lepidla, mohou však být i ve formě roztoků v organických rozpouštědlech. Chemický vzorec polyvinylacetátu je uveden na obr. 1. (Sedliačik, Sedliačik, 1998; Tesařová, 2014)



Obr. 1: Chemický vzorec polyvinylacetátu (Liptáková, Sedliačik, 1989)



Obr. 2: Reakce zesítní polyuretanu (Hu, 2011)

4. Použité stroje, pomůcky, materiál a zkušební metody

4.1. Použitý materiál

4.1.1. Materiál použitý na výrobu vzorků

Název dřeviny: Trnovník akát

Latinský název: *Robinia pseudoacacia L.*

Hustota při w₀%: 760 kg·m⁻³

Tvrdość: 97 MPa

Trnovník akát je listnatý strom, jehož dřevo je tvrdé, houževnaté, s vysokou hustotou a trvanlivostí a odolné vůči biotickým škůdcům. Řadí se mezi dřeva jádrová s úzkou žlutobílou bělí o šířce 10 až 30 mm. Jádro má barvu žluto až zelenohnědou a na příčném řezu je zřetelně viditelná hranice letokruhů s ostrým přechodem mezi jarním a letním dřevem. (Lexikon dřev, 2002)

Dřevo trnovníku akátu je kruhovitě pórovité, což znamená, že na příčném řezu vidíme v jarním dřevě široké makropóry. Mikropóry v letním dřevě se seskupují do klubíčkovitých shluků. Stěny cév jsou zpevněny spirálními ztluštěninami, které dřevu zvyšují mechanickou pevnost. Dřeňové paprsky, tvořené seskupením parenchymatických buněk orientovaných kolmo na osu kmene, jsou u tohoto druhu 1 až 5vrstevné. (Gandelová, Horáček, Šlezingerová, 2009)

Odolnost a trvanlivost dřeva je schopnost odolávat různým druhům namáhání – fyzikálnímu, biologickému a chemickému. Vyšší odolnost mají dřeva s větší hustotou, vysokým podílem jádrového dřeva a obsahem doprovodných chemických látek, jako jsou třísloviny, pryskyřice, alkaloidy a další. Toto vše dřevo akátu splňuje, a proto je velmi vhodným materiálem pro použití zejména v exteriéru. (Gandelová, Horáček, Šlezingerová, 2009).

V poslední době se objevuje stále více výrobců nabízející produkty z akátového dřeva. V drtivé většině se jedná o výrobky určené do exteriéru, a to zejména zahradní nábytek, lavice, stoly, terasy, ploty či fasádní obklady. Poměrně velkou část produktů tvoří také různé typy prolézaček, věží či skluzavek na dětská hřiště.

4.1.2. Použitá lepidla

Kestopur 1030

Jednosložkové, za vlhka tvrdnoucí polyuretanové lepidlo pro lepení dřevěných materiálů. Vhodné k přípravě spojů s vynikající odolností vůči vlhkosti.

Oblast použití

- Laminované profily
- Délkové napojování dřeva
- Délkově napojené vrstvené dřevo

Technické údaje

- Spotřeba: 150–300 g/m²
- Otevřený čas: max. 30 min
- Potřebný tlak: 0,5–1,0 N/mm²

Unilep LA

Roztokové transparentní lepidlo na bázi roztoku polyvinylacetátu v organických rozpouštědlech, zejména lihu. Lepený spoj dobře odolává povětrnostním podmínkám a vodě.

Oblast použití

- Lepení dřeva
- Lepení pěnového nebo kompaktního polystyrenu
- Lepení některých plastů

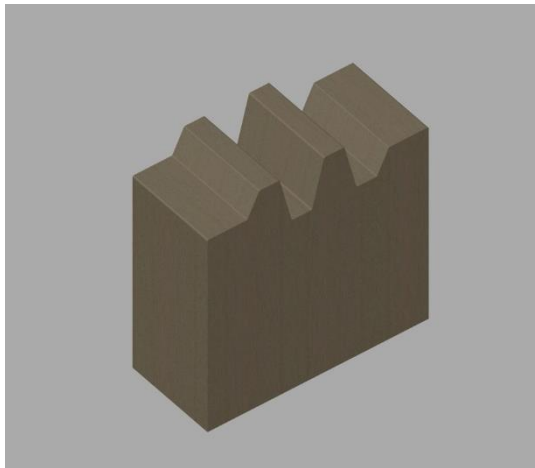
Technické údaje

- Spotřeba: 200–400 ml/m²
- Doba zavadnutí: 3–6 min.

4.1.3. Použité typy spojů

Spoj na profilovou spáru

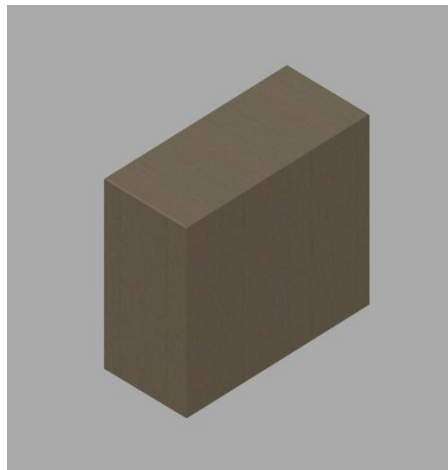
Boční plocha vzorku byla srovnána na srovnávací frézce a poté byl vyfrézován profil pomocí spodní frézky. Spojení dvou kusů je docíleno zasazením a slepením obou profilů do sebe. Model zhotoveného profilu na jedné polovině vzorku je zobrazen na obr. 3, rozměry vzorku jsou v příloze 1.



Obr. 3: Model vzorku se zhotoveným profilem (Stehlík)

Spoj na tupou spáru

Boční plocha vzorku byla srovnána do roviny na srovnávací frézce. Těmito plochami byly obě poloviny vzorku slepeny k sobě. Model jedné poloviny vzorku je zobrazen na obr. 4, rozměry vzorku jsou v příloze 2.



Obr. 4: Model vzorku lepeného na tupou spáru (Stehlík)

4.2. Použité stroje, přístroje a pomůcky

4.2.1. Stroje a pomůcky použité k výrobě vzorků

Formátovací pila W22 – S2500

Příkon pily [kW]: 4,0

Příkon předřezu pily [kW]: 0,75

Otáčky pily [min^{-1}]: 4 000/6 000

Otáčky předřezu pily [min^{-1}]: 8 000

Srovnávací a tloušťkovací frézka KDR 310 ST

Výkon motoru [kW]: 2,2

Otáčky nožového hřídele [min^{-1}]: 4 250

Počet nožů [ks]: 4

Maximální tříska [mm]: 8

Digitální posuvné měřidlo DC150

Rozsah odměřování délky [mm]: 0–150

Rozlišení [mm]: 0,01

Provozní teplota [$^{\circ}\text{C}$]: 0–40

4.2.2. Přístroje a pomůcky použité k laboratorní zkoušce

Univerzální zkušební zařízení INSTRON 3365

Maximální zatížení [kN]: 5

Maximální posuv [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]: 1 000

Maximální vertikální testovací prostor [mm]: 1 193

Klimatizační komora MEMMERT HPP 108

Pracovní teplotní rozsah [$^{\circ}\text{C}$]: 5–70

Teplotní odchylka [$^{\circ}\text{C}$]: ± 1

Nastavitelný vlhkostní rozsah [%]: 10–90

Vlhkostní odchylka [%]: $\pm 1,5$

Teploměr, vlhkoměr, lupa



Obr. 5: Univerzální zkušební zařízení INSTRON (Instron)

4.3. Postup při řešení bakalářské práce

4.3.1. Výroba zkušebních vzorků

Materiál na vzorky dodala firma KOMPAN Czech Republic s.r.o., bude zde tedy popsán pouze zprostředkovaný postup výroby. Do firmy je dodáváno řezivo již tloušťkově upraveno, a to v tloušťce 26 mm. Po zkrácení řeziva kvůli snazší manipulaci byly boční plochy srovnány na srovnávací frézce, aby bylo docíleno kvalitního spoje. Vzorky určené ke spojení natupo již byly připraveny k lepení, u ostatních kusů následovalo frézování profilu v boční ploše na spodní frézce. Lepení vzorků PUR lepidlem proběhlo ve firmě dle jejich standardního postupu, příprava druhé poloviny vzorků proběhla již mimo firmu v truhlářské dílně, avšak ze stejně připraveného výchozího materiálu.

Lepení polyvinylacetátovým lepidlem probíhalo podle pokynů výrobce, které jsou uvedeny v technickém listu. Při teplotě 20 °C byla na oba očištěné povrchy nanesena pomocí štětce tenká vrstva lepidla a po odpaření rozpouštědel (3–6 minut) byl lepený soubor složen. Z důvodu nedostatečně kvalitního spoje při lisování v hydraulickém lisu byly vzorky staženy pomocí truhlářských ztužidel, vždy po dvou lepených souborech třemi ztužidly. Vzorky byly takto ponechány 24 hodin, kdy dle doporučení výrobce dosáhne lepený spoj maximální pevnosti.

4.3.2. Výroba a příprava zkušebních těles

Obě skupiny vzorků byly následně opracovány stejným postupem. Jedna plocha byla na srovnávací frézce srovnána do roviny a na formátovací pile pomocí přípravku upravena jejich tloušťka na $25 \pm 0,2$ mm. Následovalo příčné rozřezání opět na formátovací pile na šířku tělesa $13 \pm 0,2$ mm.

Takto připravená a označená zkušební tělesa byla umístěna do klimatizační komory a podmínky byly nastaveny na teplotu 23 °C a relativní vlhkost vzduchu 50 %. V klimatizační komoře byla tělesa ponechána 21 dní. Poté následovala zkouška lepeného spoje, při které byla tělesa namáhána v tahu.

Klimatizované vzorky byly ještě před samotnou zkouškou vyříděny a byly vyřazeny ty vzorky, které měly viditelné vady či byly jinak poškozeny. U každé skupiny vzorků bylo provedeno roztřídění na vzorky lepené v radiálním a tangenciálním směru. S takto připravenými vzorky se mohlo přejít k samotné zkoušce.

4.3.3. Postup zkoušky

Zkoušení vzorků probíhalo na univerzálním zkušebním stroji Instron 3365 a data byla vyhodnocována pomocí programu Bluehill. Na začátku bylo zapotřebí nastavit v programu Bluehill samotný průběh zkoušky, rozměry vzorků a další potřebné údaje. Každý jednotlivý vzorek byl před začátkem zkoušky upnut do čelistí zkušebního stroje, a to v délce 15 až 20 mm (viz obr. 6). Následně bylo vynulováno zatížení a prodloužení zaznamenávané zkušebním strojem a byla spuštěna samotná zkouška. Po zahájení zkoušky se začaly čelisti stroje oddalovat od sebe konstantní rychlostí $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Stroj působil tahovou silou rovnoběžně s testovaným vzorkem a zkouška byla ukončena po porušení vzorku ať už ve dřevě, nebo v lepeném spoji. Program Bluehill pro každou provedenou zkoušku zaznamenal maximální zatížení, tahové napětí, protažení a Youngův modul pružnosti. Dále byla pro každý vzorek vyexportována data z průběhu zkoušky, která obsahovala protažení, zatížení a tahové napětí v závislosti na čase a krok zaznamenávání byl nastaven na 10 ms. Veškerá data byla vyexportována a vyhodnocena v programu MS Excel.



Obr. 6: Upnutí vzorku v čelistech zkušebního stroje (Stehlík)

5. Výsledky laboratorního zkoušení

Výsledky měření při tahovém zatížení jsou zaznamenány v tabulkách 1–3. U každého vzorku bylo změřeno maximální tahové napětí při porušení vzorku, dále maximální zatížení a protažení. Pro jednotlivé soubory vzorků, které jsou dány druhem lepidla, typem spoje a orientací letokruhů, bylo zpracováno statistické zhodnocení a jeho výsledky jsou uvedeny aritmetickým průměrem, směrodatnou odchylkou a variačním koeficientem.

Tab. 1: Maximální tahové napětí při porušení pro jednotlivé soubory vzorků

Maximální tahové napětí [MPa]		
	PUR	PVAc
Ozub – radiální		
Průměr	4,390	4,924
Směrodatná odchylka	1,111	1,317
Variační koeficient	0,253	0,268
Ozub – tangenciální		
Průměr	4,422	6,511
Směrodatná odchylka	1,506	1,842
Variační koeficient	0,341	0,283
Tupo – radiální		
Průměr	5,603	5,362
Směrodatná odchylka	1,776	1,440
Variační koeficient	0,317	0,269
Tupo – tangenciální		
Průměr	4,582	6,816
Směrodatná odchylka	1,337	1,376
Variační koeficient	0,292	0,202

Tahové napětí v lepené spáře (tab. 1) dosahovalo vyšších hodnot převážně u vzorků lepených polyvinylacetátovým lepidlem, výjimkou byly pouze vzorky lepené na tupo a to v radiálním směru. Největší napětí bylo změřeno u vzorků lepených na tupo v tangenciálním směru PVAc lepidlem, nejmenší naopak u ozubového spoje ve směru radiálním lepeného PUR lepidlem.

Tab. 2: Maximální dosažené zatížení při porušení pro jednotlivé soubory vzorků

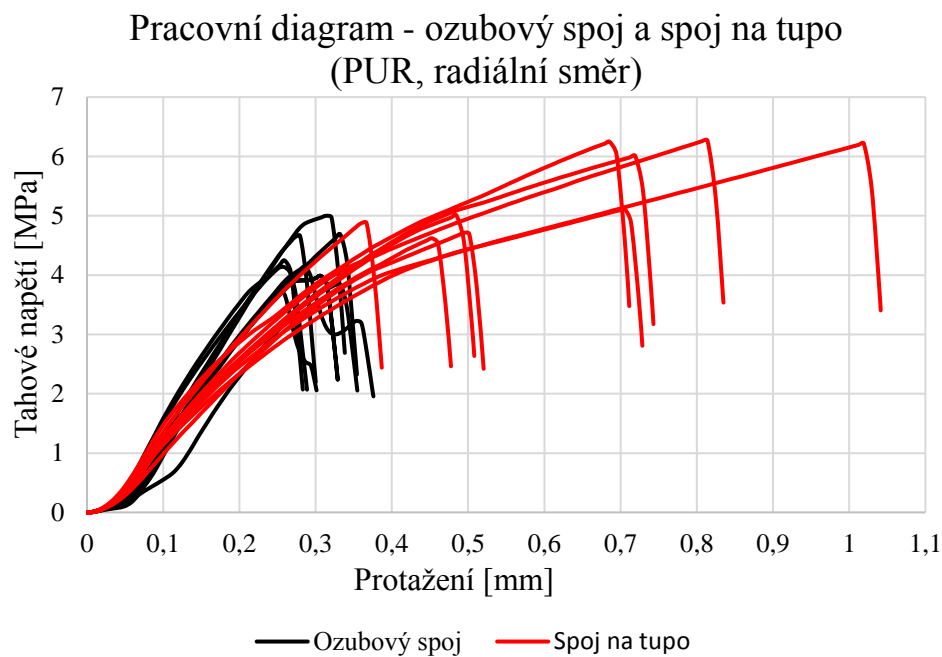
Maximální zatížení [N]		
	PUR	PVAc
Ozub – radiální		
Průměr	1049,284	1176,786
Směrodatná odchylka	265,576	314,811
Variační koeficient	0,253	0,268
Ozub – tangenciální		
Průměr	1056,936	1556,074
Směrodatná odchylka	359,929	440,338
Variační koeficient	0,341	0,283
Tupo – radiální		
Průměr	1893,681	1812,352
Směrodatná odchylka	600,219	486,779
Variační koeficient	0,317	0,269
Tupo – tangenciální		
Průměr	1548,574	2303,747
Směrodatná odchylka	451,699	465,081
Variační koeficient	0,292	0,202

V tab. 2 jsou hodnoty maximálního zatížení, kterého bylo dosaženo při porušení vzorků. Rozdíly mezi jednotlivými soubory jsou obdobné jako u hodnot tahového napětí. Nejvyšší síla byla dosažena u vzorků lepených PVAc lepidlem na tupo v tangenciálním směru, nejmenší naopak u vzorků lepených PUR lepidlem na ozub ve směru radiálním.

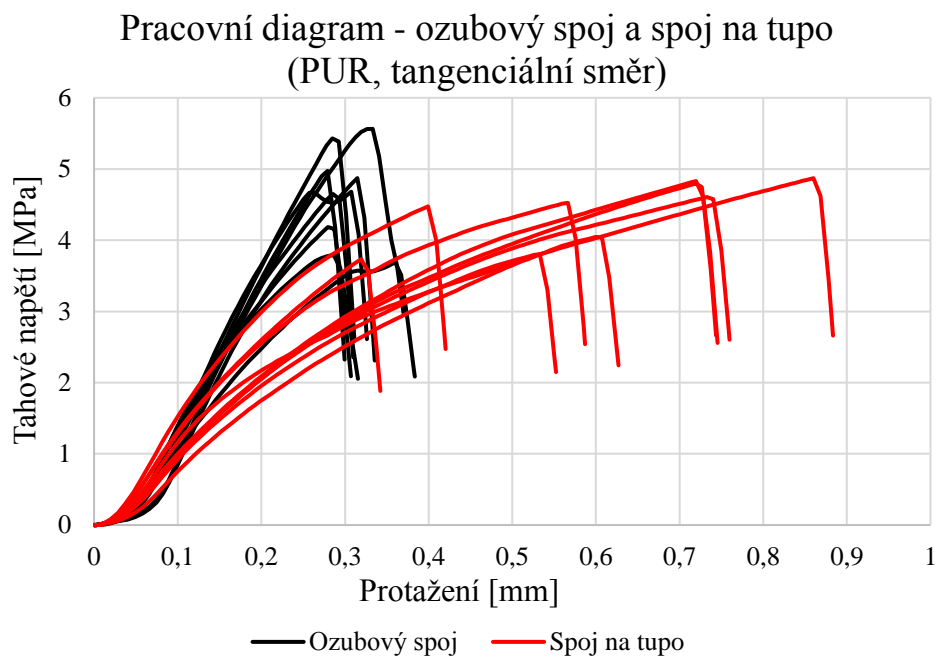
Tab. 3: Maximální dosažené protažení při porušení pro jednotlivé soubory vzorků

Maximální protažení [mm]		
	PUR	PVAc
Ozub – radiální		
Průměr	0,300	0,324
Směrodatná odchylka	0,043	0,085
Variační koeficient	0,143	0,263
Ozub – tangenciální		
Průměr	0,315	0,541
Směrodatná odchylka	0,053	0,183
Variační koeficient	0,168	0,339
Tupo – radiální		
Průměr	0,675	0,520
Směrodatná odchylka	0,326	0,170
Variační koeficient	0,483	0,327
Tupo – tangenciální		
Průměr	0,624	0,598
Směrodatná odchylka	0,277	0,180
Variační koeficient	0,443	0,301

Protažení vzorků v okamžiku porušení (tab. 3) není ve většině případů odlišné mezi lepidly, ale spíše mezi jednotlivými typy spojů. Zejména u vzorků lepených polyuretanovým lepidlem je protažení u spojů na tupo téměř dvojnásobné oproti vzorkům lepeným na ozub. V případě PVAc lepidla není rozdíl tolik markantní. Tyto rozdíly jsou více patrné na zobrazení pomocí krabicových grafů (viz obr. 15 a obr. 16).



Obr. 7: Pracovní diagramy vzorků spojených na ozub a na tupo polyuretanovým lepidlem v radiálním směru



Obr. 8: Pracovní diagramy vzorků spojených na ozub a na tupo polyuretanovým lepidlem v tangenciálním směru

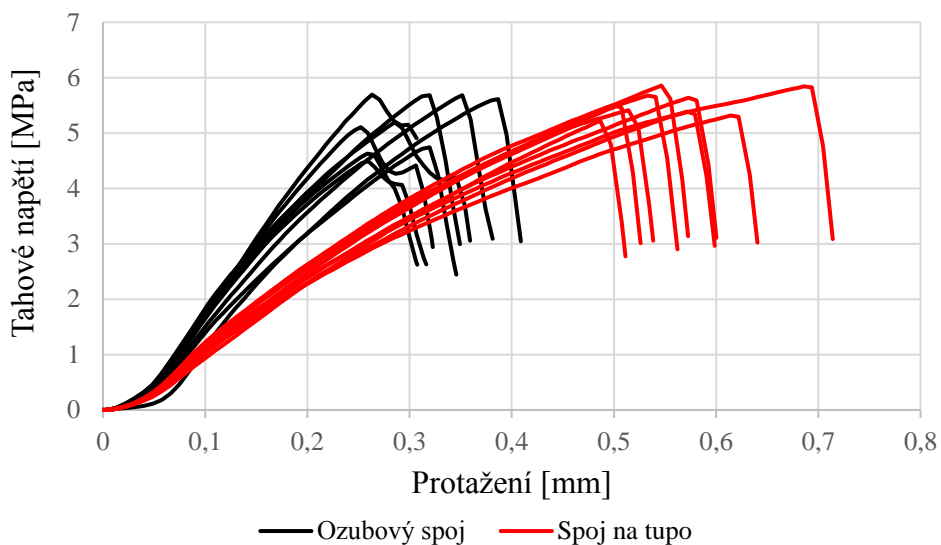
Na předchozích grafech (obr. 7 a obr. 8) jsou zobrazeny pracovní diagramy z průběhu zkoušky pevnosti v tahu. Pro zobrazení rozdílu mezi jednotlivými typy spoje bylo vybráno devět vzorků reprezentujících daný soubor. Vybrán byl vždy medián

z každého souboru a čtyři vzorky ležící nad ním a čtyři vzorky ležící pod ním – tedy oblast mezi 25% a 75% kvantilem.

Na obr. 7 jsou pracovní diagramy obou typů spojů lepených polyuretanovým lepidlem v radiálním směru. Je zde patrný rozdíl mezi spojením na tupo a na ozub. Zatímco spoje na tupo vykazují větší rozptyl a dosahují i vyšších hodnot maximálního tahového napětí, u vzorků spojených na ozub je to naopak – soubor je kompaktnější, s menším rozptylem, hodnoty napětí dosahují nižších hodnot a stejně tak je nižší také protažení.

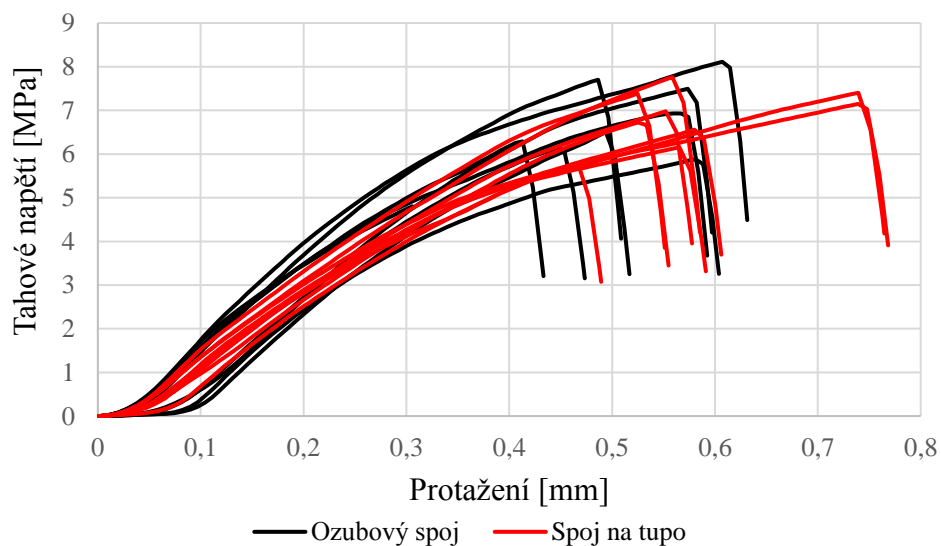
Obr. 8 zobrazuje opět pracovní diagramy vzorků na tupo a na ozub spojených polyuretanovým lepidlem, ovšem v tomto případě ve směru tangenciálním. Obdobně jako v případě radiálního směru je větší rozptyl hodnot u spojů na tupo, ovšem maximální tahová napětí dosahují přibližně podobných hodnot jako u vzorků na ozub. Patrný rozdíl je však v protažení, kde je u tupých spojů zaznamenáno protažení téměř dvojnásobné.

Pracovní diagram - ozubový spoj a spoj na tupo
(PVAc, radiální směr)



Obr. 9: Pracovní diagramy vzorků spojených na ozub a na tupo polyvinylacetátovým lepidlem v radiálním směru

Pracovní diagram - ozubový spoj a spoj na tupo
(PVAc, tangenciální směr)

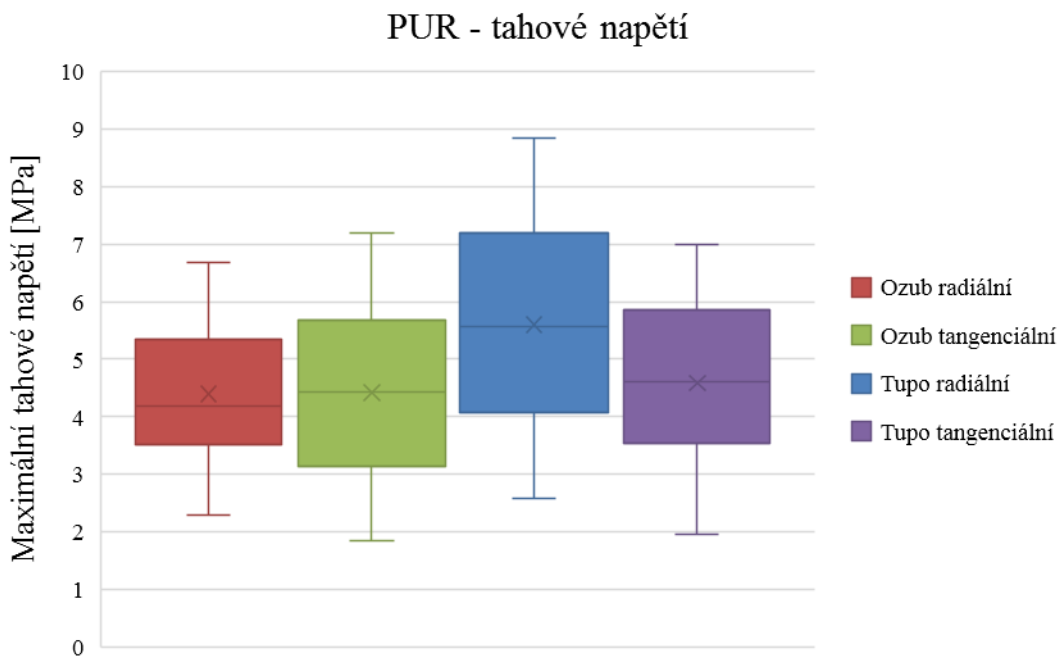


Obr. 10: Pracovní diagramy vzorků spojených na ozub a na tupo polyvinylacetátovým lepidlem v tangenciálním směru

Data pro zobrazení pracovních diagramů byla vybrána stejně jako v případě vzorků lepených polyuretanovým lepidlem (obr. 7 a obr. 8) a to z oblasti mezi 25% a 75% kvantilem.

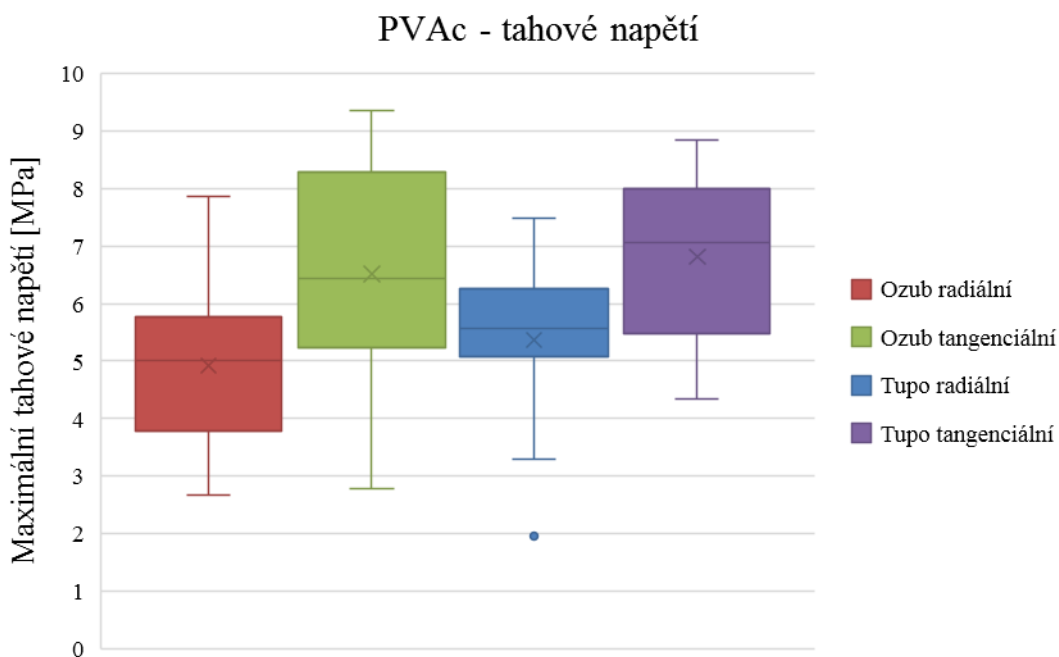
Obr. 9 zobrazuje pracovní diagramy ozubových spojů a spojů na tupo slepených polyvinylacetátovým lepidlem v radiálním směru. U vzorků na ozub je vidět obdobné chování jako v předchozích případech – tedy poměrně malý rozptyl a nižší hodnoty tahového napětí než u vzorků spojených na tupo. Naopak u vzorků spojených na tupo je zaznamenán výrazně menší rozptyl než v předchozích případech.

Pracovní diagramy vzorků lepených PVAc lepidlem v tangenciálním směru na obr. 10 jsou poměrně výrazně odlišné oproti ostatním případům. Jedním z překvapivých výsledků je to, že rozptyl hodnot je u obou typů spojů podobný a stejně tak je tomu i u maximálního protažení. Potlačení rozdílů mezi typy spojů může být dáno tím, že při testování docházelo u těchto skupin vzorků k výraznému počtu defektů ve dřevě, a ne v lepené spáře. Tento jev bude více rozebrán v kapitole diskuze.



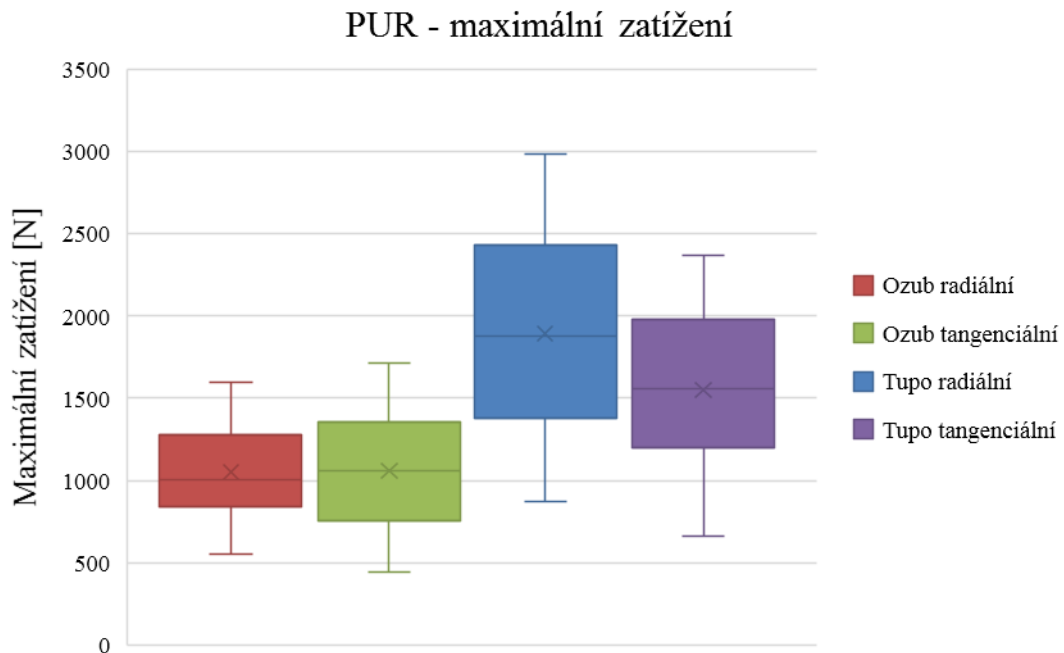
Obr. 11: Krabicový graf rozptylu hodnot tahových napětí jednotlivých skupin vzorků lepených PUR lepidlem

Na krabicovém grafu (obr. 11) je zobrazen rozptyl hodnot maximálního tahového napětí u vzorků lepených polyuretanovým lepidlem. Rozptyly hodnot se u jednotlivých skupin vzorků výrazně neliší a mediány dosahují podobných hodnot. Výjimkou jsou vzorky lepené na tupo v radiálním směru, kde medián dosahuje vyšší hodnoty v porovnání s ostatními skupinami.



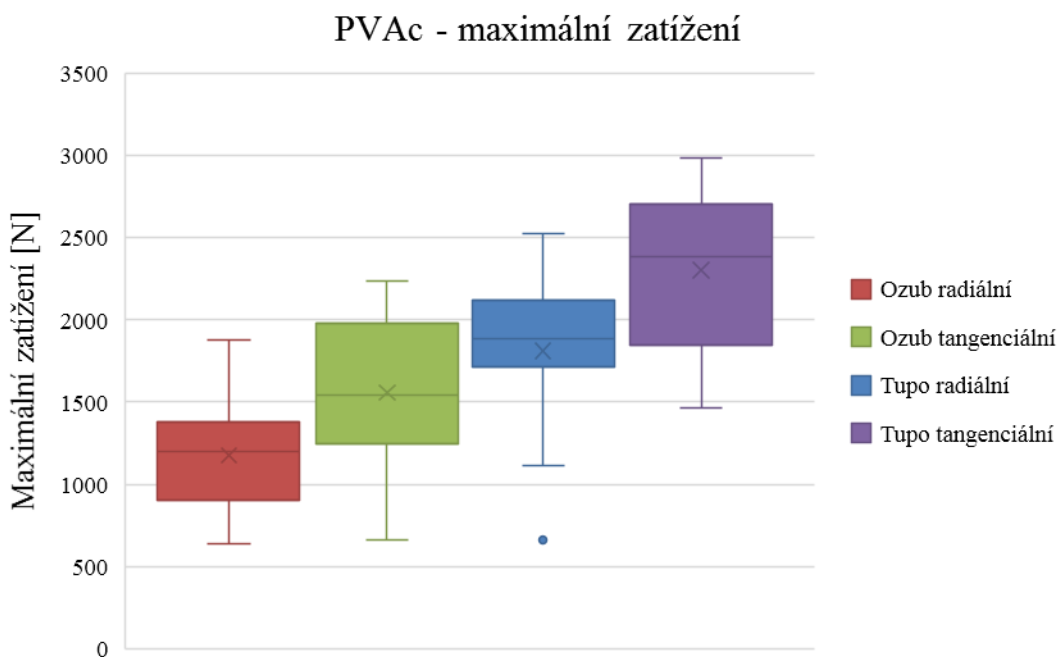
Obr. 12: Krabicový graf rozptylu hodnot tahových napětí jednotlivých skupin vzorků lepených PVAc lepidlem

Krabicové grafy na obr. 12 zobrazují rozptyl hodnot maximálního tahového napětí, které nastalo v lepené spáře při porušení vzorků lepených polyvinylacetátovým lepidlem. Z obrázku je patrné, že u skupin lepených v tangenciálním směru mají hodnoty větší rozptyl a mediány dosahují výše v porovnání se směrem radiálním.



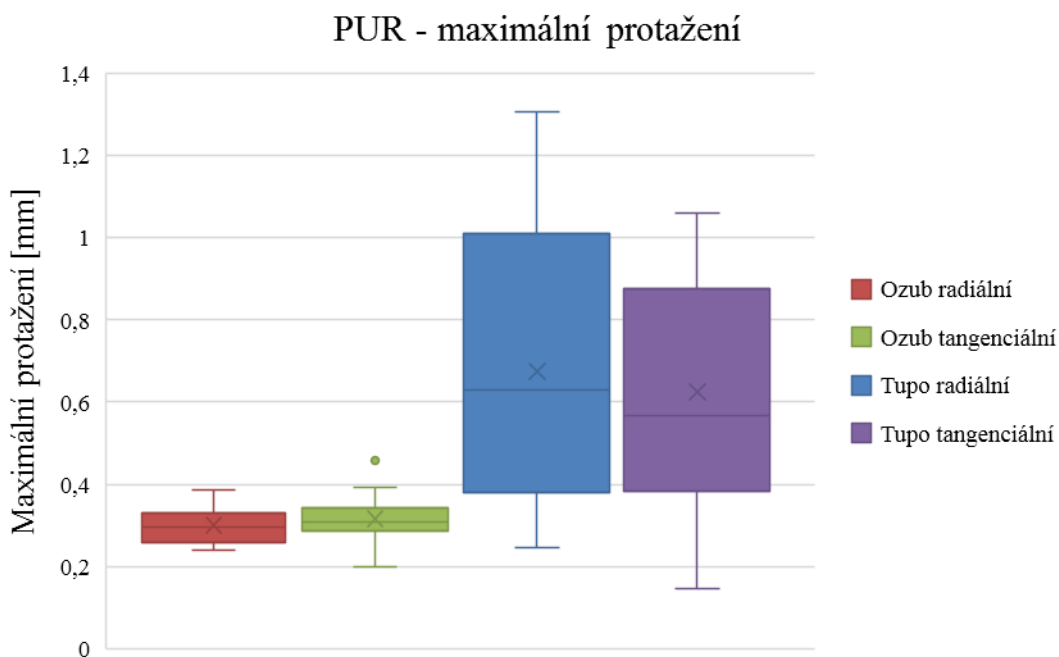
Obr. 13: Krabicový graf rozptylu hodnot maximálního zatížení jednotlivých skupin vzorků lepených PUR lepidlem

Maximální naměřené zatížení, které působilo na zkoušené vzorky, dosahovalo vyšších hodnot u vzorků lepených na tupo a to jak v radiálním, tak v tangenciálním směru (viz obr. 13). Naopak mediány hodnot vzorků lepených na ozub vykazují menší rozptyl a také nižší hodnoty.



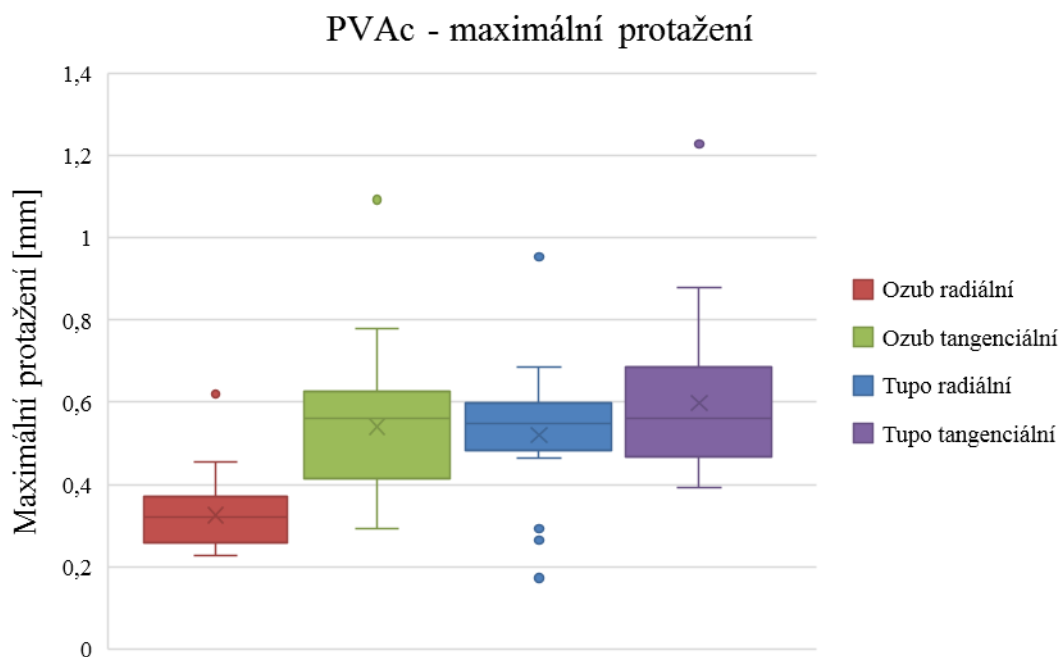
Obr. 14: Krabicový graf rozptylu hodnot maximálního zatížení jednotlivých skupin vzorků lepených PVAc lepidlem

Maximální zatížení bylo u vzorků lepených na tupo naměřeno v tangenciální rovině vyšší než v radiální. U vzorků spojených na ozub byla tato hodnota nižší, při porovnání mezi rovinami opět dosáhla vyšších hodnot rovina tangenciální (viz obr. 14).



Obr. 15: Krabicový graf rozptylu hodnot maximálního protažení jednotlivých skupin vzorků lepených PUR lepidlem

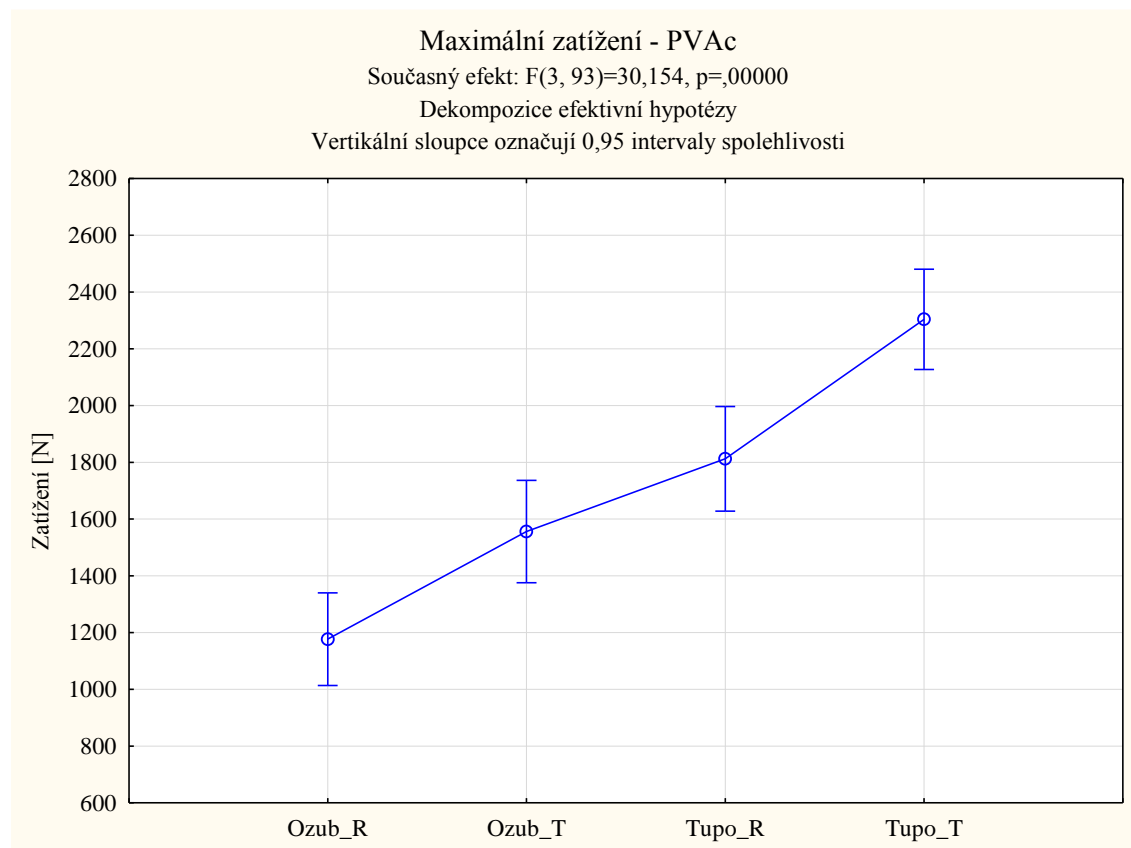
Na obr. 15 lze vidět, že mediány maximálního protažení vzorků lepených polyuretanovým lepidlem dosahují u spojů lepených na tupo téměř dvojnásobku hodnot oproti vzorkům lepeným na ozub. Také rozptyl je výrazně větší.



Obr. 16: Krabicový graf rozptylu hodnot maximálního protažení jednotlivých skupin vzorků lepených PVAc lepidlem

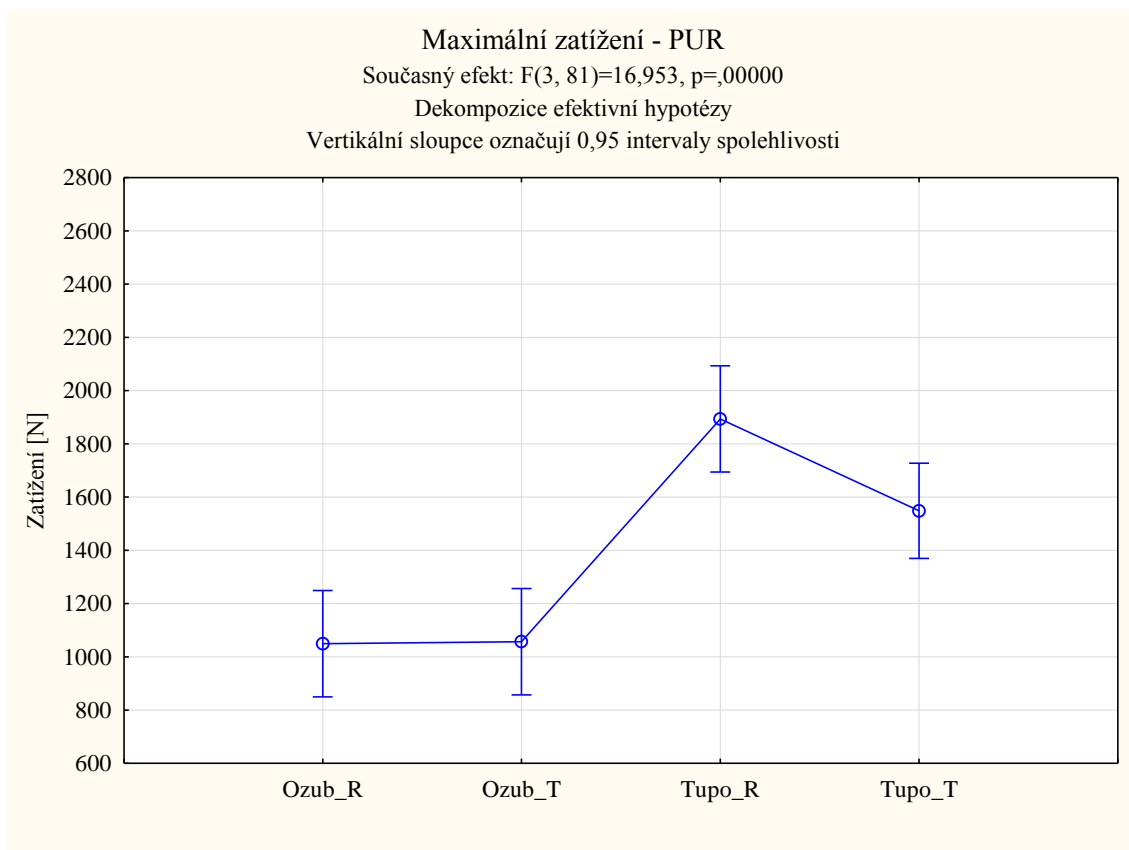
U vzorků lepených polyvinylacetátovým lepidlem (obr. 16) jsou výrazně menší rozdíly v protažení v porovnání s hodnotami získanými ze zkoušení vzorků lepených polyuretanovým lepidlem (viz obr. 15). Mediány třech typů souborů jsou velice podobné, výjimku tvoří vzorky spojené na ozub v radiálním směru. U vzorků lepených polyvinylacetátovým lepidlem (obr. 16) se vyskytuje více odlehlých hodnot, zejména u souboru lepeného na tupo v radiálním směru.

Na následujících obrázcích (obr. 17 – obr. 22) jsou zobrazeny výsledky statistického vyhodnocení ANOVA provedeného pomocí programu Statistica. Vertikální sloupce zde představují 95% intervaly spolehlivosti. Pokud se sloupce překrývají, lze tvrdit, že mezi hodnotami není statisticky významný rozdíl.



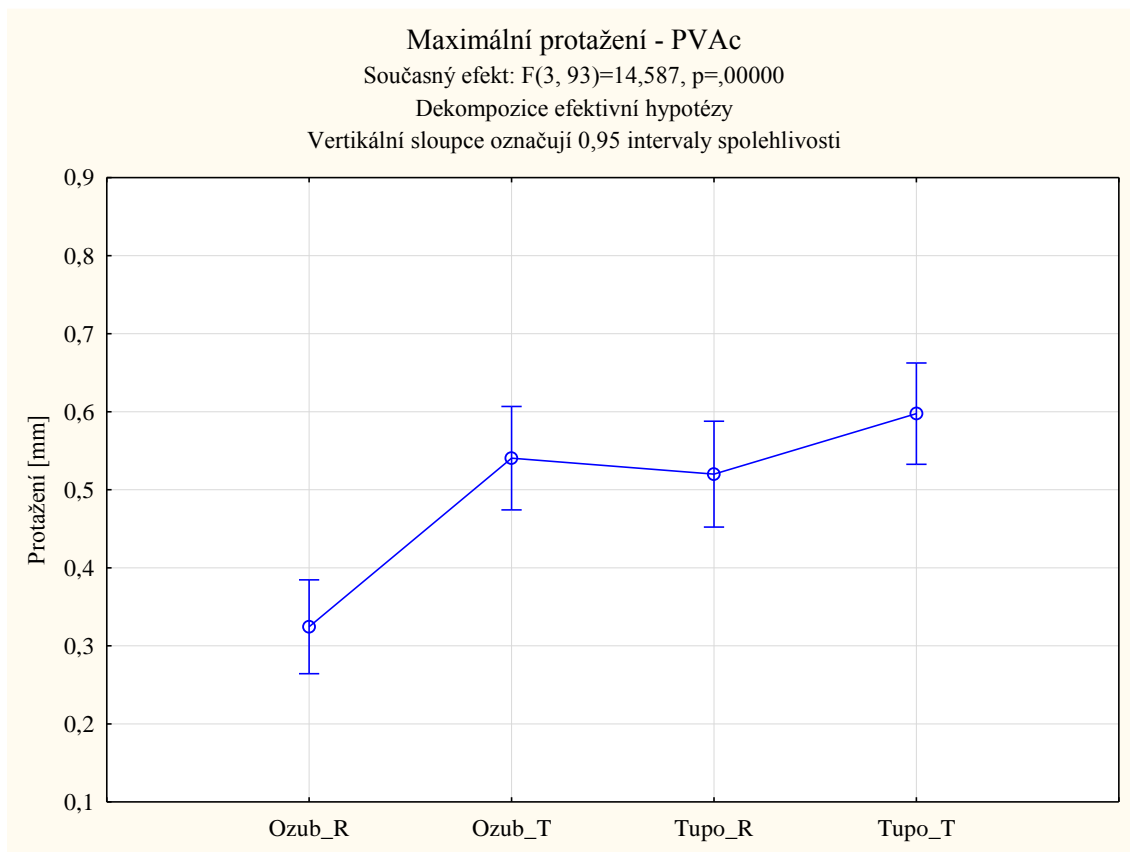
Obr. 17: Statistické vyhodnocení maximálního zatížení vzorků lepených PVAc lepidlem

Z výsledků statistického vyhodnocení maximálního zatížení u vzorků lepených polyvinylacetátovým lepidlem na obr. 17 je patrné, že hodnoty se z hlediska rovnosti dat dělí to třech skupin, mezi kterými je statisticky významný rozdíl. Jednu skupinu tvoří vzorky lepené na ozub v radiálním směru, druhou vzorky lepené na tupo v tangenciálním směru a třetí skupina je tvořena vzorky lepenými na ozub v tangenciálním směru a na tupo v radiálním směru.



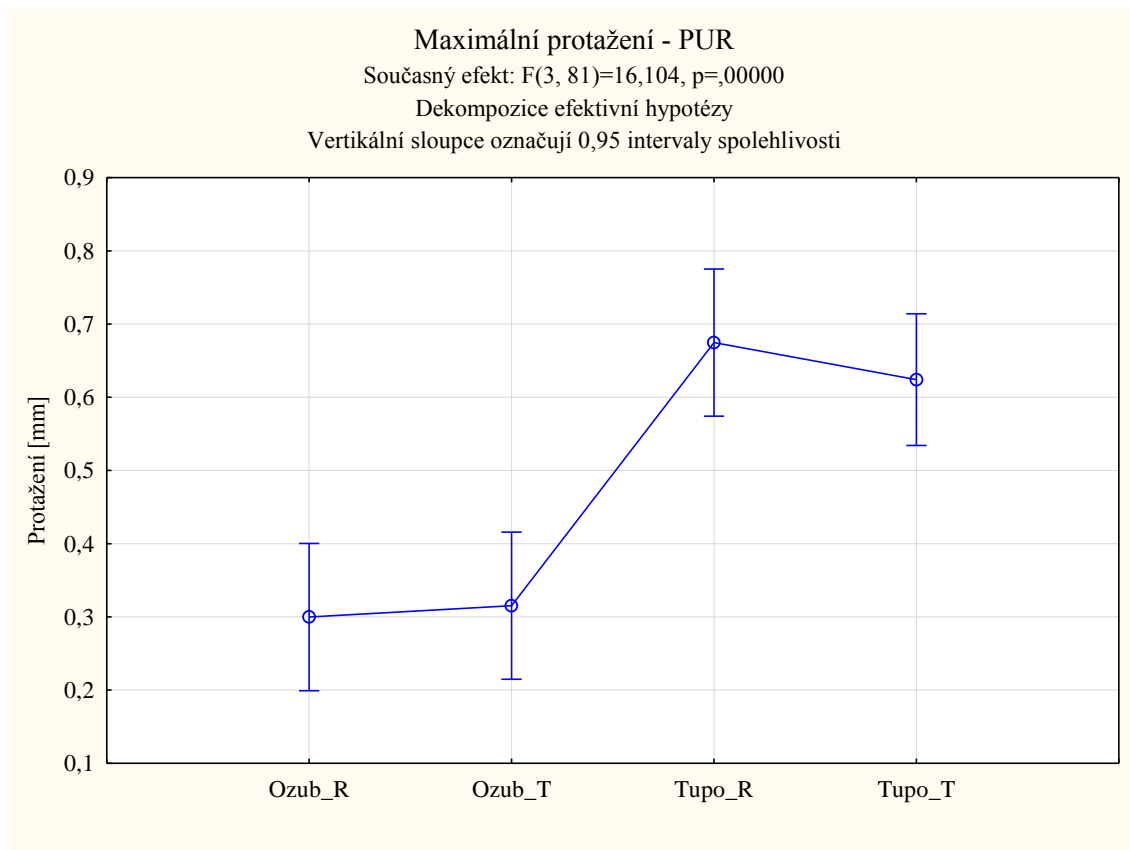
Obr. 18: Statistické vyhodnocení maximálního zatížení vzorků lepených PUR lepidlem

Na obr. 18 lze u vzorků lepených polyuretanovým lepidlem vidět pouze dvě skupiny dat, avšak více odlišné (v porovnání s výsledky vzorků lepených PVAc lepidlem na obr. 17). Je tedy možné tvrdit, že v rámci každého typu spoje není statisticky významný rozdíl hodnot, mezi typy spoje však rozdíl statisticky významný je.



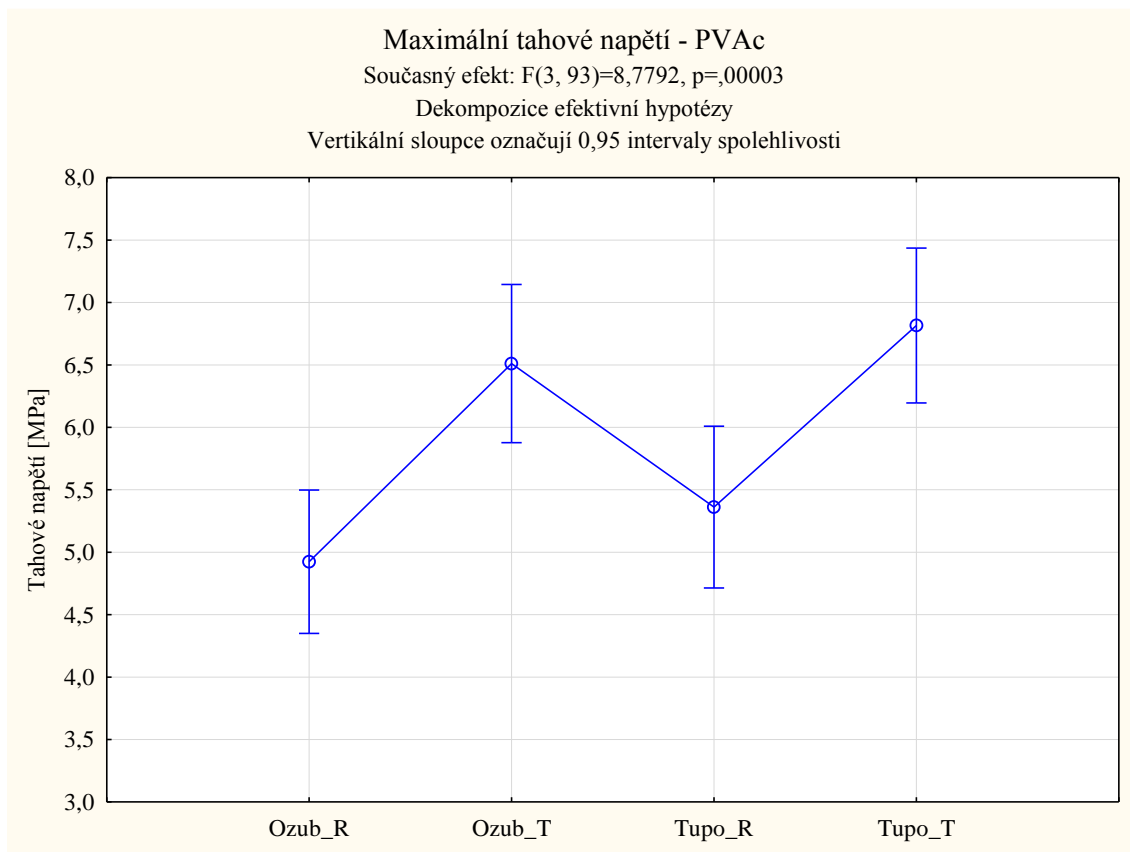
Obr. 19: Statistické vyhodnocení maximálního protažení pro vzorky lepené PVAc lepidlem

Hodnoty maximálního protažení naměřeného u vzorků lepených polyvinylacetátovým lepidlem (obr. 19) jsou rozděleny do dvou skupin, mezi nimiž je statisticky významný rozdíl. Jednu skupinu tvoří pouze vzorky lepené na ozub v radiálním směru, druhou skupinu tvoří vzorky zbývající.



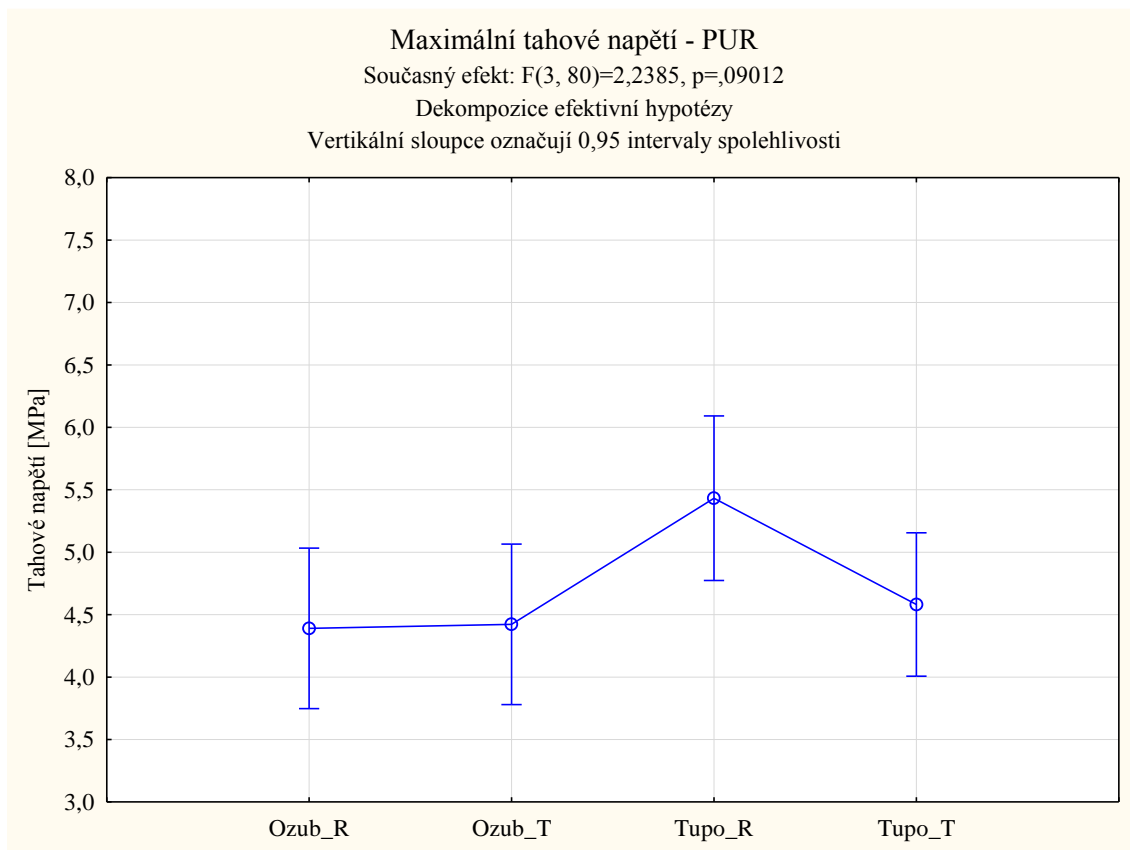
Obr. 20: Statistické vyhodnocení maximálního protažení pro vzorky lepené PUR lepidlem

Hodnoty maximálního protažení u vzorků lepených polyuretanovým lepidlem (obr. 20) jsou statisticky významně odlišné pouze při porovnání jednotlivých spojů, tedy na ozub a na tupo. V rámci jednoho spoje při porovnání radiálního a tangenciálního směru zde odlišnost zaznamenána není.



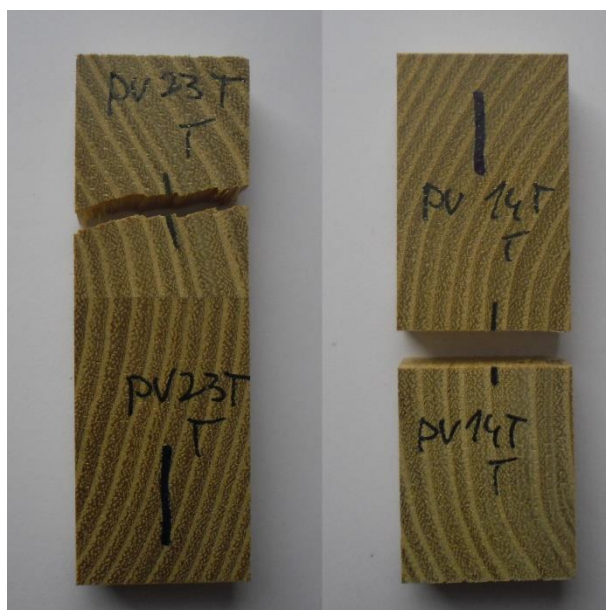
Obr. 21: Statistické vyhodnocení maximálního tahového napětí pro vzorky lepené PVAc lepidlem

Statistické vyhodnocení hodnot maximálního tahového napětí měřeného u vzorků lepených polyvinylacetátovým lepidlem na obr. 21 zobrazuje, že mezi některými typy souborů je významný rozdíl. Avšak při vzájemném porovnání všech skupin vzorků nelze tvrdit, že je mezi nimi statisticky významný rozdíl.



Obr. 22: Statistické vyhodnocení maximálního tahového napětí pro vzorky lepené PUR lepidlem

Statistické zhodnocení hodnot tahového napětí u vzorků lepených polyuretanovým lepidlem (obr. 22) zobrazuje, že mezi jednotlivými typy souborů není statisticky významný rozdíl. To potvrzuje jednak překrytí intervalů spolehlivosti a také hodnota p .



Obr. 23: Porušení vzorku ve dřevě (vlevo) a v lepené spáře (vpravo) – PVAc, na tupo (Stehlík)



Obr. 24: Porušení vzorku ve dřevě (vlevo) a v lepené spáře (vpravo) – PVAc, ozub (Stehlík)



Obr. 25: Porušení vzorku v lepené spáře – PUR, ozub (Stehlík)

6. Diskuze

Práce se zabývá posouzením pevnosti spoje v závislosti na použitém lepidle a typu spoje. Testováno bylo dřevo akátu v šířkovém napojení na tupou spáru a na profilovou spáru. K lepení bylo použito jednosložkové polyuretanové lepidlo Kestopur 1030 a roztokové lepidlo na bázi roztoku polyvinylacetátu Unilep LA. Cílem práce bylo stanovení vlivu pojivové báze lepidla a druhu lepeného spoje na jeho pevnost. Při testování a vyhodnocení výsledků byl navíc také sledován vliv radiálního a tangenciálního průběhu letokruhů.

Testování probíhalo tahovou zkouškou. K porušení vzorků docházelo jak v lepené spáře, tak ve dřevě (viz obr. 23 a 24). Porušení ve dřevě se nejčastěji vyskytovalo u vzorků lepených v tangenciálním směru. Nejvíce takovýchto případů nastalo při použití PVAc lepidla u vzorků lepených na tupo v tangenciálním směru. Vzorky porušené ve dřevě tvořily 70,83 % celého souboru. U stejného typu lepidla i směru, avšak při spojení na ozub, to bylo 34,78 %. U vzorků lepených polyuretanovým lepidlem na tupo nastalo porušení ve dřevě v tangenciálním směru u 24 % vzorků, ve směru radiálním u 15 % vzorků. Nejmenší výskyt tohoto typu porušení byl zaznamenán u vzorků lepených PVAc lepidlem na tupo v radiálním směru, kde se ve dřevě porušilo 9,09 % vzorků. U ostatních skupin vzorků došlo k porušení ve všech případech v lepené spáře. Důvod častého porušení ve dřevě zejména v tangenciálním směru jsou dřeňové paprsky. U dřeva akátu se vyskytují 1 až 5vrstevné dřeňové paprsky, které snižují jeho pevnost.

Ve spoji na profilovou spáru se při tahovém namáhání vyskytuje jak tahové, tak smykové napětí. Jinak je tomu u spoje na tupou spáru, kde nastává pouze napětí tahové. Z toho důvodu je nejvhodnější veličinou pro porovnání nikoliv napětí, ale maximální zatížení, které působilo na testovaný vzorek v okamžiku porušení.

Vliv pojivové báze lepidla na pevnost spoje byl nejvíce patrný u vzorků lepených na tupo v tangenciálním směru. Průměrné maximální zatížení dosahovalo při použití polyvinylacetátového lepidla o 48,77 % vyšší hodnoty než při použití polyuretanového lepidla. Podobný výsledek nastal u vzorků spojených také v tangenciálním směru, ovšem na ozub. Zde byla hodnota zatížení při použití polyvinylacetátového lepidla o 47,23 % vyšší v porovnání s polyuretanovým lepidlem. Nejnižší pozorovaný rozdíl nastal u vzorků lepených na ozub v radiálním směru.

Zde byla průměrná hodnota zatížení větší naopak při použití polyuretanového lepidla, a to pouze o 4,49 % v porovnání s lepidlem na bázi polyvinylacetátu.

Vliv typu použitého spoje na hodnoty maximálního zatížení byl poměrně výrazný u všech typů vzorků. Nejvíce byl rozdíl znatelný u vzorků lepených v radiálním směru, avšak průměrné hodnoty zatížení při spojení na tupo byly vždy větší než hodnoty při spojení na ozub. Největší rozdíl byl naměřen u vzorků lepených polyuretanovým lepidlem v radiálním směru, kde dosahovalo průměrné zatížení při spojení na tupo o 80,47 % vyšších hodnot v porovnání se spojením na ozub. V případě polyvinylacetátového lepidla a taktéž ve směru radiálním byla hodnota zatížení při spojení na tupo o 54,01 % vyšší než při spojení na ozub. Nejmenší rozdíl byl zjištěn u vzorků lepených polyuretanovým lepidlem v tangenciálním směru, kde zatížení u vzorků na tupo nabývalo o 46,52 % vyšších hodnot než při spojení na ozub. Celkově nejvyšších průměrných hodnot maximálního zatížení dosahovaly vzorky lepené polyvinylacetátovým lepidlem na tupo v tangenciálním směru, nejnižších hodnot vzorky lepené polyuretanovým lepidlem na ozub v radiálním směru (viz tab. 2). Nižší pevnost spojení na ozub lze vysvětlit tím, že nejčastěji docházelo k porušení vzorků sice v místě lepené spáry, avšak tam, kde je dřevo oslabeno zhotoveným profilem. Tento způsob porušení je patrný z obr. 25.

Porovnáním hodnot maximálního protažení v závislosti na typu lepidla bylo zjištěno, že největší rozdíl je u vzorků lepených na ozub v tangenciálním směru. V tomto případě bylo naměřené protažení při použití polyvinylacetátového lepidla o 71,42 % vyšší než při použití polyuretanového lepidla. Také v případě spojení na ozub v radiálním směru dosáhlo protažení při použití polyvinylacetátového lepidla vyšších hodnot než při použití lepidla polyuretanového, v tomto případě pouze o 8,25 %. Naopak u spojení na tupo byly naměřené hodnoty vyšší u vzorků lepených polyuretanovým lepidlem, v případě radiálního směru o 29,75 %, v tangenciálním směru pouze o 4,43 %.

Rozdíly v maximálním protažení nebyly tak markantní mezi použitými lepidly, jako spíše mezi jednotlivými typy spojů. Největší rozdíl byl naměřen u vzorků lepených polyuretanovým lepidlem v radiálním směru. V tomto případě byla průměrná hodnota maximálního protažení u spojení na tupo o 125,11 % vyšší v porovnání se spojením na ozub. Výrazný rozdíl byl u polyuretanového lepidla také v tangenciálním směru. Zde byla hodnota maximálního protažení u spojení na tupo o 97,92 % větší v porovnání se spojením na ozub. Také u vzorků lepených polyvinylacetátovým lepidlem bylo

změřené maximální protažení vyšší u spojů na tupo. V případě radiálního směru dosáhlo naměřené protažení u spoje na tupo o 60,27 % vyšší hodnoty než při spojení na ozub, u vzorků lepených v tangenciálním směru byla hodnota vyšší o 10,56 %. Celkové nejvyšší průměrné maximální protažení bylo naměřeno u vzorků lepených polyuretanovým lepidlem na tupo v radiálním směru, nejnižší naopak u téhož lepidla i směru, ovšem při použití spoje na ozub.

Díky naměřeným hodnotám a zjištěným skutečnostem je možné si udělat představu o chování testovaných lepidel a typů spoje při tahovém namáhání. Před praktickým použitím daného lepeného spoje by bylo vždy ideální provést testování z hlediska pevnosti spoje. Avšak toto není vždy možné jak z finančních a časových důvodů, tak z důvodu různých typů namáhání. Spoj může být při používání výrobku namáhán v tlaku, tahu, smyku, ohybu nebo krutu. Přitom působí ve spoji tahová, tlaková a smyková složka napětí, popřípadě jejich kombinace. Provádět tedy různé druhy testování je v praxi, z výše zmíněných důvodů, téměř nerealizovatelné. Na základě výsledků této práce je tedy možné si udělat představu o chování spoje na profilovou spáru a na tupou spáru lepeného PVAc a PUR lepidlem při zatěžování v tahu. Vlastnosti, chování a pevnost těchto spojů a lepidel při jiném typu namáhání, popřípadě při jiných podmínkách, může být předmětem dalšího testování.

7. Závěr

Z výsledků laboratorního měření vyplývá, že největší síla potřebná k porušení spoje byla vynaložena u vzorků lepených polyvinylacetátovým lepidlem při použití spoje na tupo v tangenciálním směru. Nejmenší síla k porušení spoje byla naopak potřebná u vzorků lepených polyuretanovým lepidlem na ozub v radiálním směru.

Z porovnání délkového protažení u jednotlivých skupin vzorků je patrné, že při použití spojení na tupo je protažení větší než při spojení na ozub. Toto platí v případě použití polyvinylacetátového i polyuretanového lepidla.

Na základě naměřených výsledků je možné tvrdit, že nejvyšší pevnosti spojů zatěžovaných tahovým namáháním je dosaženo použitím roztokového polyvinylacetátového lepidla, a to spojením na tupou spáru.

8. Summary

The results of laboratory measurements show that the greatest force needed for breaching the joint was exerted at specimens joined together with edge joint and PVAc adhesive in tangential direction. The least force was required for specimens joined together with finger joint and PUR adhesive in radial direction.

When comparing the elongation of individual specimen groups, the edge joints show greater values of elongation than the finger joints in case of both polyurethane and polyvinyl acetate adhesive.

Based on the measured results it is possible to claim that the greatest strength of joints, which are loaded by tensile force, is reached by using edge joint and PVAc adhesive.

9. Použitá literatura

1. CUSTÓDIO, João, James BROUGHTON a Helena CRUZ, 2009. A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. **29**(2), 175 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749608000365>
2. GANDELOVÁ, Libuše, Petr HORÁČEK a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ, 2009. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 978-80-7375-312-2.
3. HU, Ling, Aurelien PERCHERON, Denis CHAUMONT a Claire-Helene BRACHAIS, 2011. Microwave synthesis of core-shell structured biocompatible magnetic nanohybrids in aqueous medium. *Microwave Heating* [online]. InTech. [cit. 2017-05-03]. DOI: 10.5772/23381. ISBN 978-953-307-573-0. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/microwave-heating/microwave-synthesis-of-core-shell-structured-biocompatible-magnetic-nanohybrids-in-aqueous-medium>
4. LIPTÁKOVÁ, Eva a Milan SEDLIAČIK, 1989. *Chémia a aplikácia pomocných látok v drevárskom priemysle*. Bratislava: Alfa, Edícia drevárskej, celulózsárskej a papiernickej literatúry
5. OSTEN, Miloš, 1975. *Práce s lepidly a tmely*. Praha: SNTL, Polytechnická knižnice (SNTL)
6. ROWELL, Roger M, 2005 *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, ISBN 0849315883.
7. SEDLIAČIK, Milan a Ján SEDLIAČIK, 1998 *Chemické látky v drevárskom priemysle*. Zvolen: Technická univerzita. ISBN 80-228-0745-1.
8. TESAŘOVÁ, Daniela, 2014 *Povrchové úpravy dřeva*. Praha: Grada, Profi & hobby. ISBN 978-80-247-4715-6.

9. Lexikon dřev. *Ldf.mendelu.cz* [online]. 2002 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=ak
10. Formátovací pila S2500. *Uni - max* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <https://www.uni-max.cz/formatovaci-pila-s2500/d/>
11. KDR 310 ST - srovnávací a tloušťkovací fréзка. *Nářadí - HAROM* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.naradi-harom.cz/produkty-kdr-310-st-srovnavaci-a-tloustkovaci-frezka-detail-162>
12. Posuvné měřidlo 150 digital. *Uni - max* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <https://www.uni-max.cz/posuvne-meridlo-150-digital/d/>
13. 3300 Dual Column Universal Testing Systems. *INSTRON* [online]. [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.instron.us/products/testing-systems/universal-testing-systems/electromechanical/3300/3360-dual-column>
14. ČSN EN 204: *Klasifikace termoplastických lepidel na dřevo pro nekonstrukční použití*. 2017.
15. ČSN EN 12765: *Klasifikace reaktoplastických lepidel na dřevo pro nekonstrukční aplikace*. 2017.
16. Technický list: Unilep LA: Stachema, 2015
17. Technický list: Kestopur 1030: Kiilto, 2009

10. Seznam zkratek

PVAc	polyvinylacetát
PUR	polyuretan
ČSN	česká technická norma
EN	evropská norma
MPa	megapascal
$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	kilogram na metr krychlový
$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	gram na metr čtvereční
$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	newton na milimetr čtvereční
$\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}$	mililitr na metr čtvereční
kW	kilowatt
N	newton
kN	kilonewton

11. Seznam tabulek

Tab. 1: Maximální tahové napětí při porušení pro jednotlivé soubory vzorků.....	25
Tab. 2: Maximální dosažené zatížení při porušení pro jednotlivé soubory vzorků	26
Tab. 3: Maximální dosažené protažení při porušení pro jednotlivé soubory vzorků	27

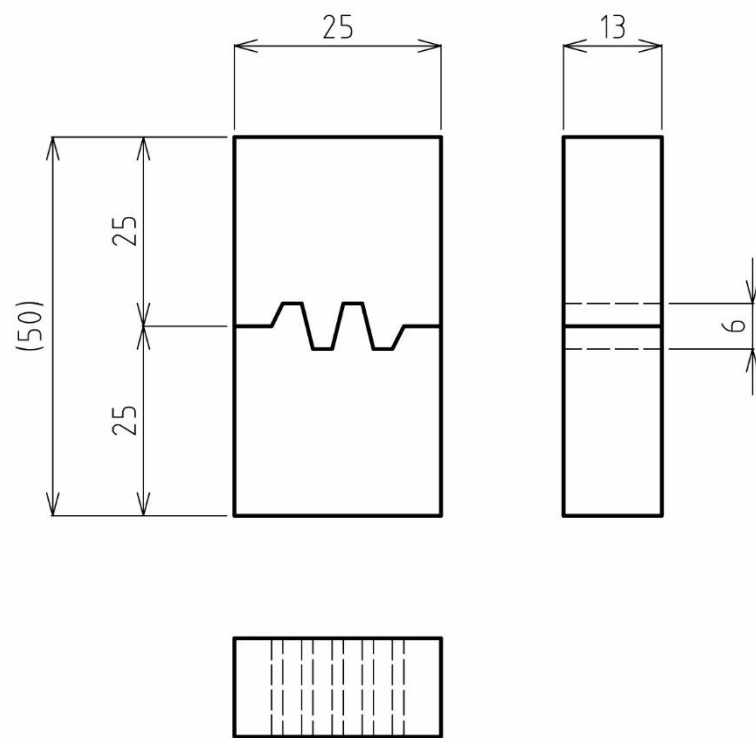
12. Seznam obrázků

Obr. 1: Chemický vzorec polyvinylacetátu (Liptáková, Sedláčik, 1989).....	18
Obr. 2: Reakce zesílení polyuretanu (Hu, 2011)	18
Obr. 3: Model vzorku se zhotoveným profilem (Stehlík).....	21
Obr. 4: Model vzorku lepeného na tupou spáru (Stehlík).....	21
Obr. 5: Univerzální zkušební zařízení INSTRON (Instron).....	22
Obr. 6: Upnutí vzorku v čelistech zkušebního stroje (Stehlík).....	24
Obr. 7: Pracovní diagramy vzorků spojených na ozub a na tupo polyuretanovým lepidlem v radiálním směru	28
Obr. 8: Pracovní diagramy vzorků spojených na ozub a na tupo polyuretanovým lepidlem v tangenciálním směru	28
Obr. 9: Pracovní diagramy vzorků spojených na ozub a na tupo polyvinylacetátovým lepidlem v radiálním směru	30
Obr. 10: Pracovní diagramy vzorků spojených na ozub a na tupo polyvinylacetátovým lepidlem v tangenciálním směru	30
Obr. 11: Krabicový graf rozptylu hodnot tahových napětí jednotlivých skupin vzorků lepených PUR lepidlem	32
Obr. 12: Krabicový graf rozptylu hodnot tahových napětí jednotlivých skupin vzorků lepených PVAc lepidlem	32
Obr. 13: Krabicový graf rozptylu hodnot maximálního zatížení jednotlivých skupin vzorků lepených PUR lepidlem	33
Obr. 14: Krabicový graf rozptylu hodnot maximálního zatížení jednotlivých skupin vzorků lepených PVAc lepidlem	34
Obr. 15: Krabicový graf rozptylu hodnot maximálního protažení jednotlivých skupin vzorků lepených PUR lepidlem	34
Obr. 16: Krabicový graf rozptylu hodnot maximálního protažení jednotlivých skupin vzorků lepených PVAc lepidlem	35
Obr. 17: Statistické vyhodnocení maximálního zatížení vzorků lepených PVAc lepidlem	36
Obr. 18: Statistické vyhodnocení maximálního zatížení vzorků lepených PUR lepidlem	37
Obr. 19: Statistické vyhodnocení maximálního protažení pro vzorky lepené PVAc lepidlem	38

Obr. 20: Statistické vyhodnocení maximálního protažení pro vzorky lepené PUR lepidlem	39
Obr. 21: Statistické vyhodnocení maximálního tahového napětí pro vzorky lepené PVAc lepidlem.....	40
Obr. 22: Statistické vyhodnocení maximálního tahového napětí pro vzorky lepené PUR lepidlem	41
Obr. 23: Porušení vzorku ve dřevě (vlevo) a v lepené spáře (vpravo) – PVAc, na tupo (Stehlík)	42
Obr. 24: Porušení vzorku ve dřevě (vlevo) a v lepené spáře (vpravo) – PVAc, ozub (Stehlík)	42
Obr. 25: Porušení vzorku v lepené spáře – PUR, ozub (Stehlík).....	42

13. Přílohy

Příloha 1



Příloha 2

