



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

VYUŽITÍ ALTERNATIVNÍCH PLNIV PRO DŘEVĚNÉ LEPENÉ SPOJE

USE OF ALTERNATIVE FILLERS FOR WOOD GLUED JOINTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Adéla Fritzová

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav technologie stavebních hmot a dílců
Studentka:	Adéla Fritzová
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23
Studijní program:	B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor:	Stavebně materiálové inženýrství

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušební mříždem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití alternativních plniv pro dřevěné lepené spoje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci práce bude v první fázi provedena rozsáhlá rešerše dosavadních poznatků o způsobech úprav povrchu dřeva a modifikaci lepidla. V druhé fázi bude navržena řádná metodika pro modifikaci lepidla se začleněním stupně plnění a způsobu plnění lepidla vybraným plnivem. Rovněž se autor práce bude zabývat provedením povrchové úpravy dřeva plazmatem. Uvedené modifikace a úpravy mohou hrát velmi důležitou roli při stanovení trvanlivosti lepených spojů. Experimentálně bude metodika aplikována na bukové dřevo, přičemž je uvažováno s použitím modifikovaného jednosložkového polyuretanového lepidla vybraným plnivem. Účinnost modifikace a povrchové úpravy bude posouzena na základě trvanlivosti lepených spojů, zejména je uvažováno s expozicí v prostředí hydrotermálního a vlhkostního namáhání.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

1. Ověření vlivu modifikace polyuretanového lepidla alternativním plnivem (na přírodní bázi) na chování spoje ve vybraných expozičních prostředích;
2. U vybraného spoje ověřit možný vliv předúpravy povrchu dřevěného adherendu, např. plazmatickým výbojem;
3. Vyhodnocení a porovnání pevnostních parametrů lepených spojů.

Předpokládaný rozsah práce je cca 40 až 50 stran.

Seznam doporučené literatury a podklady:

1. Handbook of Adhesion (2nd Edition), Ed. Packham, D. E., 2005, John Wiley & Sons.
2. Kiguchi M. In: Surface modification and activation of wood. Marcel Dekker, New York 1996, p. 197-227.
3. Bigan, M., & Mutel, B. (2018). Cold remote plasma modification of wood: Optimization process using experimental design. Applied Surface Science, 453, 423–435.
4. Dodiuk, H., Belinski, I., Dotan, A., and Kenig, S. (2006). "Polyurethane adhesives containing functionalized nanoclays," J. Adhes. Sci. Technol. 20(12), 1345-1355

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 22. 11. 2022

L. S.

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
vedoucí ústavu

doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
vedoucí práce

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá možnostmi modifikace lepidel a povrchu dřeva pro konstrukční účely. Práce obsahuje charakteristiku nejčastěji využívaných modifikačních procesů na dřevo, základní principy lepení dřevěných spojů, poznatky o běžně používaných konstrukčních lepidlech a rešerše dosavadních znalostí o možných plnivech. Na základě optimalizačního procesu je zvoleno plnivo, které je aplikováno do lepidla. Společně s plazmatickou úpravou povrchu dřeva je zvolené plnivo podrobena bližšímu prozkoumání vlivu na trvanlivost lepeného spoje.

KLÍČOVÁ SLOVA

Modifikace dřeva. Lepidla na dřevo. Plniva. Plazmatická předúprava.

ABSTRACT

This thesis deals with the possibilities of modifying adhesives and wood surfaces for structural purposes. The thesis includes a characterization of the most commonly used wood modification processes, the basic principles of bonding wood joints, knowledge of commonly used structural adhesives and a review of existing knowledge on possible fillers. Based on an optimization process, the filler that is applied to the adhesive is selected. Together with the plasma treatment of the wood surface, the selected filler is subjected to a closer examination of its influence on the durability of the bonded joint.

KEYWORDS

Wood modification. Wood adhesives. Fillers. Plasma pre-treatment.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FRITZOVÁ, Adéla. *Využití alternativních plniv pro dřevěné lepené spoje*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Využití alternativních plniv pro dřevěné lepené spoje* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 26. 5. 2023

Adéla Fritzová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Využití alternativních plniv pro dřevěné lepené spoje* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2023

Adéla Fritzová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D., za odborné vedení a rady poskytnuté při vypracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Petře Lacikové za užitečné rady, pomoc a čas, který mi věnovala.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Modifikace dřeva	11
2.1	Druhy modifikací a úprav dřeva	11
2.1.1	Impregnace.....	12
2.1.2	Chemická modifikace	14
2.1.3	Mikrovlnná modifikace.....	15
2.1.4	Tepelná modifikace.....	16
2.2	Povrchová úprava dřeva	18
2.2.1	Broušení, frézování	18
2.2.2	Podkladní nátěr	19
2.2.3	Plazmatický výboj.....	20
3	Lepení dřeva	21
3.1	Princip lepení	22
3.2	Rozdělení lepidel.....	23
3.3	Lepidla pro dřevěné konstrukce podle platných hEN norem.....	24
3.3.1	Lepidla na fenolické bázi (PRF, MUF)	24
3.3.2	Emulzní polymerní izokyanatany (EPI)	25
3.3.3	Polyuretanová lepidla (PUR).....	25
4	Cíl práce.....	27
5	Metodika práce	28
5.1	Zhodnocení stávajících poznatků.....	30
5.1.1	Rešeršní poznatky o modifikaci lepidel různými plnivy	30
5.1.2	Předúprava dřeva plazmatem.....	36
5.2	Experimentální ověření trvanlivosti lepeného dřeva.....	37
5.2.1	Použité materiály	37

5.2.2	Příprava a výroba zkušebních těles.....	39
5.2.3	Expoziční namáhání přeplátovaných spojů	40
5.2.4	Ověření fyzikálně mechanických vlastností	41
6	Výsledky a diskuse	41
6.1	Etapa 1 – Zhodnocení modifikací lepidla a úprav dřeva na základě provedené rešerše	41
6.2	Etapa 2 – Vyhodnocení vlivu plnění lepidla a vlivu modifikace povrchu adherendu na trvanlivost lepeného spoje	45
6.2.1	Ověření vlivu plnění PUR lepidla.....	45
6.2.2	Ověření vlivu předúpravy dřeva	47
7	Závěr	49
	Použitá literatura	51

1 Úvod

Dřevo je jedním z nejdéle používaných stavebních materiálů. V minulosti jej lidstvo masivně využívalo především pro stavbu obydlí. Postupem času se jeho vlastnosti stávaly nedostatečné a byly upřednostňovány modernější stavební materiály.

Jelikož je dřevo obnovitelným materiálem, je snaha o jeho využití poměrně velká. Díky novým technologiím se množství konstrukčních materiálů na bázi dřeva stále zvyšuje. Poptávka po zvýšené trvanlivosti, využití materiálu do nepříznivých podmínek a vyšší únosnost, docílila vývoje modifikačních procesů, které jsou v dnešní době široce aplikované právě na dřevo. Procesů na úpravu vlastností dřeva je již na světě vyvinuto mnoho a zakládají se na různých principech. Mezi základní procesy modifikace dřeva patří například impregnace, tepelná modifikace nebo povrchová úprava dřeva. Z hlediska dlouhodobé udržitelnosti je nutné uvažovat i o dopadech na životní prostředí. Proto výrobní závody i výzkumy zabývající se úpravami dřeva se zaměřují na vývoj netoxických materiálů s možností recyklace na konci své životnosti[1].

Použití lepidla je jedním z klíčových kroků při výrobě dřevěných prvků. Lepení je prováděno za účelem vytvoření jednoho celku, který může dosahovat většího rozpětí, vyšší houževnatosti či pevnosti. Lepidlo je schopno vytvořit vazbu s povrchem dřevěného adherendu, která se definuje pomocí jevů adheze a koheze. Pro zlepšení spolupůsobení lepeného povrchu se provádějí povrchové úpravy (např. broušení, frézování, použití primeru nebo technologii plazmatického výboje). Další variantou pro vylepšení vlastností lepeného spoje je modifikace lepidla prostřednictvím různých plniv. V závislosti na způsobu použití lepeného prvku, se následně volí typ lepidla, druh plniva a způsob povrchové úpravy [2].

Relativně novou technologií pro povrchovou úpravu dřeva se stala plazma. V dosavadních poznatcích bylo prokázáno, že aplikace plazmatického výboje na povrch dřeva zlepší proces lepení i vlastnosti lepeného spoje. Je zde důležité zdůraznit, že báze použitého lepidla hraje velkou roli ve vlivu na výslední parametry daného lepeného spoje [3].

Právě výše zmiňovaná témata jsou podkladem pro obsahovou náplň této práce, která se zabývá problematikou lepících procesů a jeho možného zlepšení.

2 Modifikace dřeva

Dřevo je velmi univerzální materiál, který se používá pro různé účely díky svým dobrým vlastnostem. Jedná se například o jeho estetické, akustické, tepelné a mechanické parametry. Na druhou stranu má dřevo také řadu nevýhod: např. rozměrové změny při změně relativní vlhkosti vzduchu, také náchylnost k biologickému napadení, a změny vzhledu, které mohou omezovat možnosti jeho konečného využití. Proto je v některých případech nutná modifikace dřeva, která může potlačit nebo zmírnit některé z jeho nevýhodných vlastností. Cílem může být zlepšení biologické odolnosti, rozměrové i UV stability nebo snížení sorpce vody, které by neměly vést ke ztrátě zlepšených vlastností během životnosti výrobku. Jedním z bonusů modifikace dřeva je, že přináší nové možnosti využití dřeva. Důležité je však najít optimální parametry každého z procesů modifikace, protože je známé, že úpravou struktury dřeva může dojít k poklesu jeho mechanických parametrů [4][5].

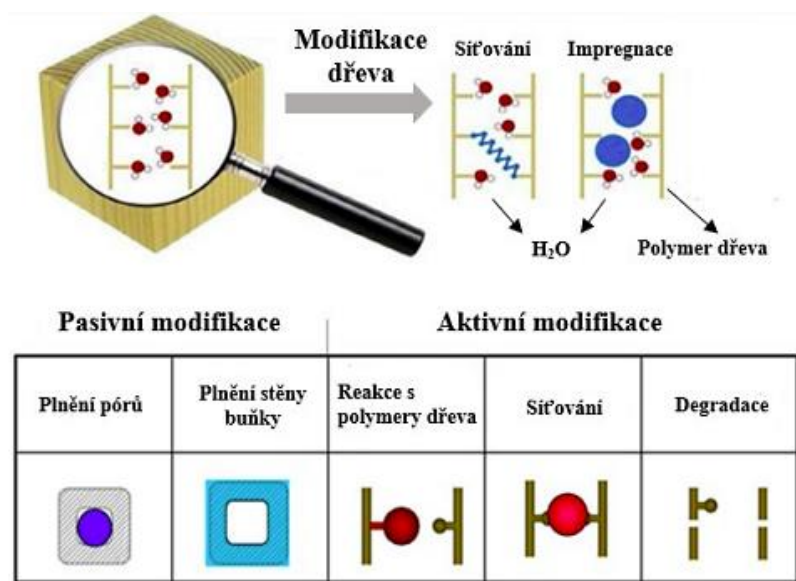
Modifikace dřeva zahrnuje působení chemického, fyzikálního nebo biologického činidla na materiál, které vede k požadovanému zdokonalení vlastností během životnosti modifikovaného dřeva. Vzhledem k současným environmentálním trendům by při zabudování modifikovaného dřeva do konstrukce nemělo docházet k uvolňování toxických látek během provozu nebo po skončení životnosti (při likvidaci nebo recyklaci). Tento předpoklad vylučuje použití biocidních přípravků a odděluje tak ochranu dřeva od jeho modifikace [4][5].

2.1 Druhy modifikací a úprav dřeva

Modifikace lze obecně rozdělit do dvou skupin – aktivní a pasivní. Aktivní modifikace vedou ke změně chemické povahy materiálu (chemická nebo tepelná modifikace). Při pasivní modifikaci dochází ke změně vlastností, ale beze změny chemického složení materiálu (impregnace). Jedná se zejména o tyto způsoby působení použitého procesu modifikace (Obr. 1):

- *Vyplnění lumenu chemickou látkou*, za účelem zvýšení pevnostních parametrů a zpomalení procesu absorpce vody. V delším časovém období tento proces nemění sorpční chování dřeva.

- *Napouštění látky za účelem vyplnění dutin v buněčné stěně i v lumenu.* Tento proces má tendenci snižovat bobtnání a smršťování dřeva, což může mít příznivý vliv na dlouhodobé sorpční vlastnosti.
- *Modifikační procesy zaměřené na změnu chemické struktury složek buněčné stěny (ligninu, celulózy a hemicelulózy) jsou obvykle nejúčinnější.* Modifikaci v tomto užším smyslu lze rozdělit na tepelné a enzymatické úpravy a chemické modifikace. Mnoho vlastností lze trvale zlepšit, zejména trvanlivost, rozměrovou stabilitu a snížení rovnovážné vlhkosti [5].



Obr. 1: Schematické znázornění rozdělení modifikací dle způsobu působení [6]

2.1.1 Impregnace

Impregnační modifikace dřeva je definována jako jakákoli metoda, jejímž výsledkem je naplnění dřevní hmoty inertním materiálem (impregnačním prostředkem) za účelem dosažení požadované změny vlastností. Princip této úpravy spočívá v proniknutí impregnačního prostředku do buněčné stěny, kde způsobí zvětšení objemu a vytvoří “uzavřený“ materiál. Díky tomu se proces impregnační úpravy řadí mezi pasivní modifikace, protože nezpůsobuje změnu chemického složení materiálu. Dřevo se nejčastěji impregnuje za účelem snížení příjmu vody v plynné nebo kapalně fázi. Což se později může projevit na zvýšení rozměrové stability, zlepšení mechanických vlastností, zvýšení biologické odolnosti nebo změně odstínu barvy [1][4].

Důležitou podmínkou při samotném procesu impregnace je, že buněčná stěna musí být v nabobtnalém stavu, aby byl zajištěn přístup k impregnační látce. Dále by měly

být zajištěny dostatečně malé molekulární složky impregnačního prostředku, aby pronikly do buněčné stěny. K fixaci impregnačního činidla může dojít pomocí dvou hlavních mechanismů:

- monomerní (nebo oligomerní) impregnace s následnou polymerizací uvnitř buněčné stěny,
- difúze rozpustného materiálu do buněčné stěny s následnou úpravou tak, aby se materiál stal nerozpustným.

Podstatné je, aby fixovaný impregnační prostředek nebyl toxický, dokud je v buněčné stěně a za jakýchkoli jiných okolností, kdy se z buněčné stěny uvolňuje (např. při likvidaci nebo při recyklaci). Impregnačními látkami jsou buď jednoduché organické sloučeniny nebo jejich směsi nebo látky organického původu. Jedná se například o pryskyřice, soli, sacharidy, křemičitany, vosky, oleje a další. Lze je aplikovat na povrch dřeva pomocí nátěrů, postřiků, ponořování, máčení nebo tlakovou impregnací. A podle hloubky průniku impregnace do dřeva se rozlišují na povrchové, mělké a hluboké [1][4].

Tlaková impregnace

Pro tlakovou impregnaci se používají hermeticky uzavřené kovové kotle. Tyto autoklávy zajišťují potřebný tlak (do 900 kPa) a požadovanou teplotu impregnační látky. Dřevo se v nich nechává impregnovat několik hodin. Při tomto procesu se kombinuje přetlak a podtlak, aby bylo dosaženo optimálního požadovaného příjmu impregnační látky pro daný rozměr, dřevinu a použití. Před zahájením procesu by mělo být dřevo očištěno od kůry a lýka. Na povrchu odkorněného dřeva by neměly být nečistoty. Doporučuje se impregnovat hotové dílce nebo jejich polotovary, aby při dalším opracování nedošlo ke zbytečným ztrátám impregnační látky. Taktéž se před procesem doporučuje sytit dřevo vodní parou z důvodu zvýšení příjmu impregnační látky a následného ochlazení, což může působit jako podtlak, který zvýší příjem impregnační látky na povrchu [1].

Povrchová impregnace

Povrchová impregnace se provádí máčením, postřikem, nátěrem anebo ponořováním. Tato procedura se uskutečňuje v máčecích vanách (nádržích), komorách nebo kotlích válcového tvaru. Zařízení musí být zajištěno proti úniku impregnační látky do okolí. Je velmi důležité, aby impregnační látka měla v celém svém objemu stejné vlastnosti (koncentrace, viskozita a teplota). Průnik impregnační látky je pouze do

hloubky několika milimetrů. Její příjem se dá mírně zvýšit různými způsoby navrtávání, nařezávání nebo napichování povrchových vrstev.

Impregnace ponořováním je vhodná spíše pro krátkodobější ochranu povrchu dřeva. Při této technice se mohou naráz impregnovat celé balíky proloženého řeziva. Pokud ponoření trvá déle než 30 minut jedná se o máčení [1].

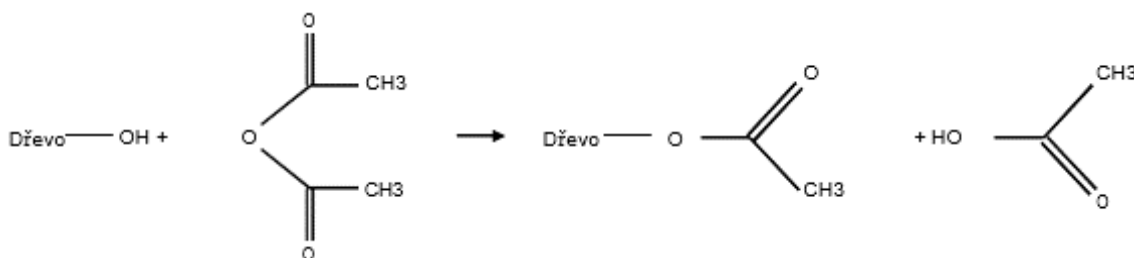
2.1.2 Chemická modifikace

Jedná se o účinnou metodu pro zlepšení mechanických vlastností, rozměrové stability, odolnosti proti rozpadu a plísním a odolnosti proti stárnutí rychle rostoucího dřeva. Chemická modifikace dřeva by se definuje jako reakce chemického činidla s polymerními složkami dřeva (celulózy, hemicelulózy a ligninu), která vede k vytvoření kovalentní vazby mezi reagujícími prvky. Jinými slovy dochází k chemické reakci mezi činidlem a hydroxylovou skupinou polymeru buněčné stěny. Výsledkem může být vytvoření jedné chemické vazby s jednou OH skupinou nebo zesíťování dvou či více OH skupin. Jelikož se mění chemická povaha materiálu, je tato modifikace považována za aktivní modifikaci [4][7].

Chemická modifikace dřeva se používá k izolaci různých polymerů buněčných stěn, ke studiu rozdílů ve vlastnostech v důsledku změny chemického složení a ke zlepšení užitných vlastností dřeva. Mezi nejčastější metody patří acetylační úprava, furfurylační úprava, nano ošetření sloučeninami, ošetření dusíkatými hydroxymethylovými sloučeninami a další [7][8].

Acetylace

Tento proces spočívá v reakci anhydridu kyseliny octové se dřevem (Obr. 2) a vede k esterifikaci přístupných hydroxylových skupin v buněčné stěně za vzniku vedlejšího produktu kyseliny octové. Acetylace je jednosměrná adiční reakce, což znamená, že jedna acetylová skupina reaguje s jednou hydroxylovou skupinou bez polymerace [8].



Obr. 2: Reakce dřeva s anhydridem kyseliny octové [5]

Proces acetylace se v podstatě skládá z impregnačního kroku, po němž následuje zahřívání a zahájení exotermické reakce (při teplotě přibližně 70 °C). Po reakci se směs kyseliny octové a acetanhydridu ze dřeva odstraní [5].

Acetylace je v poslední době brána jako jedna z nejspolehlivějších modifikačních metod pro netoxické konzervování dřeva. Odolnost acetylovaného dřeva proti rozkladu a napadení houbami je pravděpodobně zajištěna zamezením difúze uvnitř buněčné stěny. Při snížení rychlosti difúze dojde ke zpomalení transportu degradačních činidel houby do dřeva a tím zpomalí přenos vyživujících dřevních látek pro houbu. Dále bylo prokázáno, že reakce dřeva s acetanhydridem zvyšuje odolnost vůči ultrafialovému záření a snížila tak povrchovou erozi o 50 %. Acetylace má vliv i na mechanické vlastnosti. Dřevěné kompozity vyrobené z acetylovaného nábytku vykazují v důsledku acetylace mírné zvýšení pevnosti. Taktéž zvyšuje modul přetržení a modul pružnosti [8][9].

Furfurylace

Při této úpravě se využívá chemická látka furfurylalkohol, která se získává ze zemědělských odpadů (např. cukrová třtina, kukuřičné klasy). Proces furfurylace dřeva spočívá nejprve v impregnaci ošetřovacím roztokem furfurylalkoholu a katalyzátoru. Poté je nutný mezistupeň sušení a následně se provádí reakční vytvrzování. Během vytvrzování se dřevo zahřívá na teplotu 80-140 °C vstříkáním páry, díky čemuž se zahájí proces polymerizace. Doba vytvrzování je 6-8 h. Nakonec se dřevo vysuší v sušárně, aby se minimalizovaly emise a dřevo se expedovalo suché [5].

Furfurylace dřeva je známá jako mimořádně účinná netoxická metoda pro získávání dřevěných výrobků s vysokou rozměrovou stabilitou. Tyto výrobky mají hodnoty bobtnání a smršťování o více jak 50 % nižší než neošetřené dřeviny. Taktéž mají vysokou biologickou trvanlivost, která dosahuje nejvyšší třídy trvanlivosti (třídy 1). Furfurylované dřevo se vyznačuje větší tvrdostí a pružností ve srovnání s neošetřeným dřevem, je však také křehčí [6].

2.1.3 Mikrovlnná modifikace

Při mikrovlnné modifikaci se používá mikrovlnné zařízení. Toto zařízení je schopno vytvořit mikrovlny o frekvenci až 2,45 GHz a tím způsobit částečnou destrukci neprůchodných ztenčenin buněčných stěn a dřeňových paprsků. Díky tomu se zvýší propustnost dřeva a zároveň se nijak výrazně nesníží pevnost, protože dřeňové paprsky neplní mechanickou funkci dřeva. Mikrovlnná úprava se tedy často používá před

impregnací dřeva, protože může být zvýšena propustnost špatně propustných dřevin před nanesením ochranných prostředků impregnace. Z našich dřevin se to může týkat například špatně propustného smrkového dřeva, ale i jádrových dřev (dub, jasan) nebo dřev s nepravým jádrem (buk). Mikrovlákná technologie se dále používá pro sušení, plastifikaci nebo rozvláknování dřeva [1].

2.1.4 Tepelná modifikace

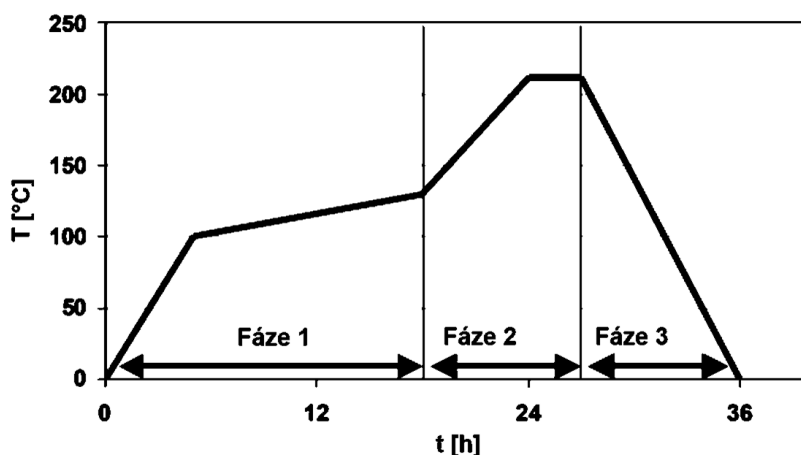
Při tepelné modifikaci je dřevo vystavováno teplotám od 160 °C do 240 °C za účelem dosažení požadovaných vlastností materiálu. Rozmezí teplot je pevně dané, protože teploty nižší než 140 °C vedou pouze k nepatrným změnám vlastností, naopak u teplot vyšších jak 300 °C dochází k nežádané degradaci materiálu. Podmínkou tohoto procesu je snížený obsah kyslíku, jelikož přítomnost kyslíku může způsobit hoření dřeva při vysoké teplotě, a taktéž může mít za následek silnou degradaci celulózy, a tím ještě více snížit pevnost dřeva. Procesy tepelné modifikace proto probíhají v ochranné atmosféře, kterou může být pára, plynný dusík nebo horký olej. Stejně jako u chemické modifikace, tak i zde dochází ke změně buněčné struktury, tudíž lze tuto úpravu zařadit mezi aktivní modifikace [4][5][6].

Celý proces tepelné úpravy se dá rozdělit do několika fází. V první fázi se uskutečňuje rozklad hemicelulózy a následkem toho vznikají další reakce, které vedou k částečnému štěpení ligninu. Ve druhé fázi se ustálí kondenzace ligninu díky vytvoření methylenových můstků, které spojují aromatická jádra. V poslední fázi procesu, při klimatizaci, dochází k esterifikaci, což je reakce kyseliny a alkoholu za vzniku vody a esteru. Výstupním produktem je upravené dřevo, které dosahuje nižší rovnovážné vlhkosti dřeva než neupravené dřevo, a to díky menšímu počtu reaktivních OH skupin. Dále v upraveném dřevě vznikají nové látky (na bázi aromatických uhlovodíků nebo dřevný dehet), které dobře působí vůči vodě a proti napadení hmyzem nebo dřevokaznými houbami. Vlivem esterifikace se snižuje hygroskopicita dřeva, čímž se zvyšuje trvanlivost a rozměrová stabilita [1].

V současné době existují různé postupy k provedení tohoto procesu, z nichž většina se liší podle způsobu, jakým vylučují kyslík ze systému a jaký druh ochranné atmosféry používají. Existují čtyři skupiny úprav na trhu: finský Thermowood, holandský Plato Wood, francouzský Retification a olejová tepelná úprava [5][6].

Thermowood

Tato metoda byla vyvinuta technickým výzkumným střediskem VTT ve spolupráci s finským dřevařským průmyslem a je licencována členům finské asociace *Thermowood*. Při tomto procesu se vzduch nahrazuje vodní párou a teplota dosahuje až 215 °C. Technologie *thermowood* se dá rozdělit do tří fází procesu, který je graficky znázorněn na Obr. 3 [10].



Obr. 3: *Fáze výrobního procesu Thermowood [10]*

V první fázi nastává vysokoteplotní sušení. Pomocí tepla a páry se rychle zvedne teplota v sušárně na 100 °C. Následné zvyšování teplot do 130 °C probíhá pozvolněji a vlhkost dřeva klesá téměř na nulu. Druhá fáze nastává hned po vysokoteplotním sušení a je nazývána jako tepelné zpracování. Probíhá v uzavřené komoře, za přítomnosti vodní páry a teploty zde dosahují až 215 °C. Po dosažení cílové úrovně zůstává teplota konstantní po dobu 2 až 3 hodin v závislosti na konečném použití

Posledním krokem je chlazení a úprava vlhkosti dřeva. Tato fáze nastává ihned po tepelném zpracování. Dochází k ochlazování pomocí vodního rozprašovače a je nutno dbát vysoké opatrnosti, protože vysoký teplotní rozdíl mezi dřevem a venkovním vzduchem může způsobit praskání dřeva. Když teplota klesne na 80-90 °C, je nutné opětovné zvlhčování, aby dřevo dosáhlo vhodné vlhkosti pro konečné použití. Tato konečná vlhkost by měla být 5-7 %. V závislosti na teplotě ošetření a dřeva trvá poslední fáze 5-15 hodin [10].

Hydrotermální modifikace

Při této metodě se využívá kombinace zvýšené teploty, tlaku a ošetřovacího média (pára, voda, pufrovací roztok). Hydrotermální modifikací se snižuje rovnovážný obsah

vody a díky tomu se zvyšuje rozměrová stabilita dřeva. Dále se zlepšuje odolnost dřeva proti rozkladu s minimálním poklesem pevnosti.

Obecně se tato úprava provádí za přítomnosti páry nebo kapalné vody pod určitým tlakem a při různých teplotách. Typická teplota ošetření se pohybuje od 180 do 260 °C. Výhodou je, že se nepoužívají žádné nebezpečné chemikálie. Vzhledem k různým teplotám, které se při hydrotermální modifikaci využívají, lze ošetření dřeva rozdělit do tří kategorií. První možností je superkritická úprava vodou, kde se využívají teploty vyšší než 374 °C. Druhou možností je úprava kapalné vody v okolním prostředí, kdy teploty dosahují 25 - 100 °C. Poslední a nejběžnější úpravou je podkritická úprava vody, která probíhá při teplotách 100 až 374 °C s vodou a jinými pufovacími roztoky jako ošetřujícím médiem. Tato úprava se obvykle provádí v uzavřené vysokotlaké nádrži naplněné vodou. Využití pufového média má výhodu v tom, že ošetřené dřevo je více hydrofobní povahy, protože absorpce vody do dřeva je omezená a může zabránit růstu hub. Taktéž se zlepší odolnost proti rozkladu. Bohužel má i nevýhody, protože snižuje pH, což vede ke zvýšení hmotnostních ztrát a následnému poklesu pevnosti dřeva [11].

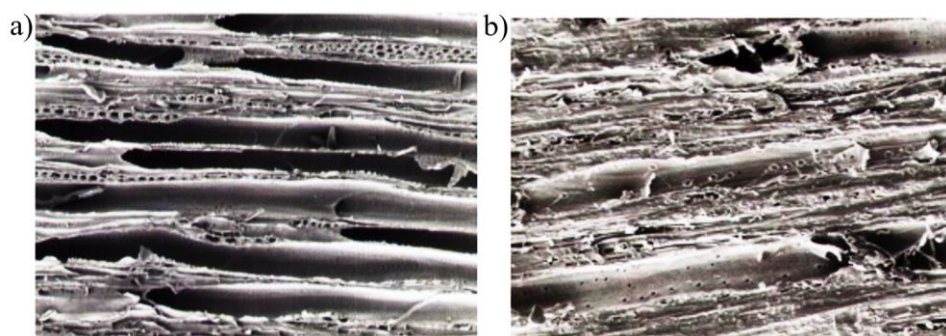
2.2 Povrchová úprava dřeva

Povrchová modifikace se zaměřuje na ošetření několika prvních vrstev povrchu dřeva. Vnitřní struktura dřeva zůstává nemodifikovaná, tudíž si zachovává své přirozené vlastnosti. Požívá se na přímé vylepšení vlastností, například k úpravě povrchové volné energie (hydrofobní povrch dřeva) nebo zlepšení kompatibility s lepidly nebo nátěry (smáčivost povrchů) [12].

2.2.1 Broušení, frézování

Broušení a frézování se provádí za účelem očištění a aktivace povrchu dřeva před procesem lepení. U čerstvě nařezaného dřeva dochází v průběhu času k tzv. inaktivaci povrchu. Při tomto jevu dochází na povrchu dřeva ke tvorbě pryskyřičné vrstvy, která může teoreticky zabránit přímému kontaktu mezi lignocelulózovým substrátem a lepidlem. Tato vrstva vzniká migrací extraktních látek (mastné a pryskyřičné kyseliny, estery, terpeny) na povrch dřeva, okyselení povrchu, změnu poměru mezi celulórou a ligninem nebo oxidací povrchu dřeva (vlivem vysokých teplot).

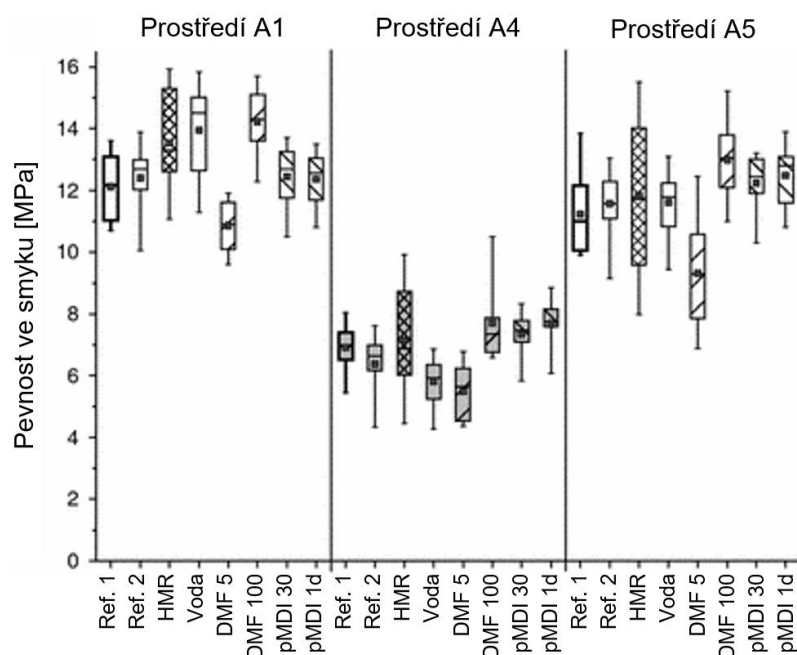
Je proto nutné provádět tyto povrchové úpravy ještě před nanesením lepidla pro lepší smáčení povrchu kapalinou a pro znovuotevření čerstvého povrchu (Obr. 4), který obsahuje molekulární přitažlivé síly [13].



Obr. 4: a) broušený povrch dřeva, b) frézovaný povrch dřeva [14]

2.2.2 Podkladní nátěr

Primer neboli podkladní nátěr podporuje přilnavost lepidla nebo nátěru k podkladu a mechanicky stabilizuje povrch dřeva. Obecně se primery dělí na reaktivní a nereaktivní typy. Mezi reaktivní primery patří například hydroxymethylovaný resorcinol (HMR), který je založen na formaldehydu a vyžaduje dlouhou čekací dobu před nanesením lepidla. Nereaktivní primery jsou často roztoky polyolů rozpustných ve vodě, jako je například N, N-dimethylformamid (DMF). Dalším nereaktivním nátěrem může být voda. Základní nátěr vede k lepším vlastnostem lepeného spoje, avšak záleží na předchozí povrchové úpravě, druhu dřeviny a typu primeru (Obr. 5) [15][16].



Obr. 5: Závislost pevnosti ve smyku na druhu primeru v daných prostředích [16]

V rámci této studie byla provedena a vyhodnocena řada zkoušek. Závěrem bylo, že vysoce koncentrovaný DMF 100 nejvýznamněji zvyšuje pevnost ve smyku a zvyšuje procento kohezního poškození ve dřevě (vyšší adheze). Žádných významných výsledků nebylo dosaženo v případě použití primeru pDMI, u vodního postřiku byla zjištěna vyšší pevnost ve smyku pouze v prostředí A1. Primer HMR nevykazuje významný účinek na pevnost ve smyku, ale podstatně zvyšuje procento kohezního poškození dřeva ve všech testovaných prostředích [16].

2.2.3 Plazmatický výboj

Plazmu lze definovat jako tzv. čtvrté skupenství hmoty. Do této fáze se látka dostane vlivem vysokých teplot a způsobí to, že se molekuly rozpadnou na atomy a elektrony v atomech jsou tak silně excitovány, že se pohybují volně bez vazby na konkrétní atom. Plynná fáze plazmy je elektricky neutrální směsí elektronů, iontů, fotonů a dalších prvků, které jsou navozeny pomocí vnějšího zdroje energie o vysoké frekvenci. Plazmu lze klasifikovat podle podmínek, při kterých vznikala, na studené a horké plazma. Horké plazma se získává při vysokém tlaku a k jeho realizaci je zapotřebí značný výkon. Teplota plynu je téměř stejná pro všechny složky plazmatu a může být velmi vysoká. Tento typ plazmatu se vyskytuje například v plazmových hořácích a v elektrických obloucích, kde se používá pro svařování a řezání kovů. Studené plazma se získává při nižších tlacích a spotřebovává méně energie. Vyznačují se tím, že teplota elektronů je mnohem vyšší než teplota plynu. Takové plazma lze generovat elektrickými výboji v plynech za nízkého tlaku. Teploty studeného plazmatu pro povrchovou úpravu dřeva jsou od 25 do 50 °C. Běžnými zdroji plazmatu pro úpravu materiálů jsou plynné atmosféry, vakuové oblouky a lasery [1][12].

3 Lepení dřeva

Pod pojmem lepidlo na dřevo se rozumí materiál, kterým se spojují pevné části bez destrukce jejich struktury. Lepidlo se proto nanáší na materiál za účelem vytvoření trvalého spojení a vzniku vazeb mezi lepenými prvky a samotným lepidlem. Takový proces vede ke vzniku jednoho celku bez využití mechanického připojení. Díky této skutečnosti dokážou lepené spoje lépe přenést napětí z jednoho prvku na druhý, prostřednictvím rovnoměrnějšího rozložení napětí, než je tomu u mechanicky připojených spojů. Mnohdy proto lze pro lepení použít dřevo nižší pevnostní třídy, protože výsledný prvek plně využije pevnost a tuhost lepeného spoje [2][17].

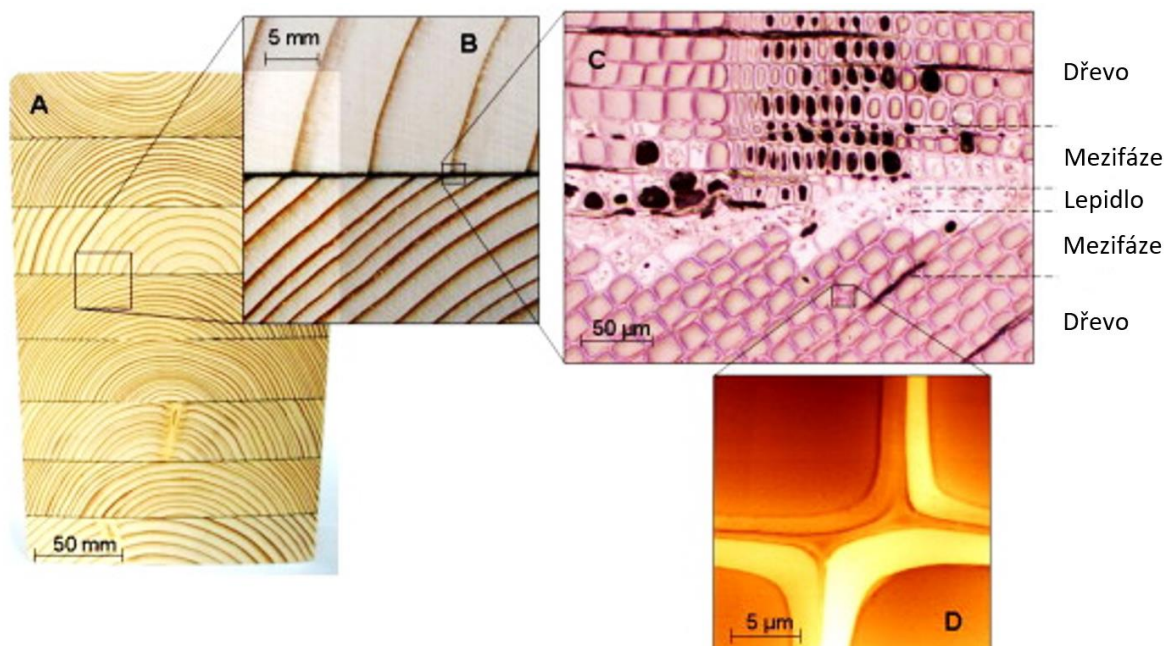
Pro dosažení dobrého lepeného spoje je nutné dodržovat obecné podmínky lepení. V první řadě je nutné zvolit správné lepidlo, které bude odpovídat podmínkám budoucího výrobku. Výběr lepidla je taktéž závislý na povaze adherendů nebo procesu lepení. Čistota lepených povrchů je další důležitou podmínkou. Na povrchu by se neměly vyskytovat žádné nečistoty (oleje, prach), které by mohly ohrozit soudržnost spoje. Proto existují fyzikální nebo chemické procesy, kterými lze tyto nečistoty odstranit. Dále povrchy adherendů můžeme smáčet kapalnou fází kvůli vytěsnění vzduchu a jiných plynů. Dobré smáčení vede k lepší manipulaci s lepidlem na kontaktním povrchu lepených prvků. Posledním ovlivňujícím faktorem je výběr procesu lepení. Zde řešíme například vhodné zvolení teploty, tlaku a době lisování, které mají velký význam na budoucí lepený výrobek.

Spojování pomocí lepidel má své výhody i nevýhody. Mezi výhody patří již zmíněné rovnoměrné rozložení napětí, dále spojení materiálů libovolného tvaru, odolnost proti únavě a cyklickému zatěžování a mnoho dalších. Za nevýhody považujeme nemožnost vizuální kontroly spoje, potřeba přídržných prvků, lisů a dalších zařízení potřebných pro proces lepení. Dále by se dalo uvažovat o životnosti, která je závislá na okolním prostředí u zhotoveného výrobku, nebo může nastat napadení například bakteriemi, plísní nebo škůdci. Dřevo je náchylné na změnu relativní vlhkosti vzduchu, kdy vlivem její zvýšení dochází k objemovým změnám dřevěného adherendu a zvolené lepidlo musí být dostatečně flexibilní, aby se těmto změnám dokázal lepený spoj přizpůsobit [17].

3.1 Princip lepení

Při lepení je nutné, aby lepidlo bylo tekuté a rovnoměrně se rozprostřelo po celém lepeném povrchu. Pro efektivní rozprostření se navíc používá vhodná tlaková síla. Během procesu tuhnutí a vytvrzování vznikají fyzikální (přeměna roztoku) a chemické (vznik kovalentních vazeb) procesy nebo kombinace obou. Po určité době lepidlo zatvrdne a vykazuje dostatečnou pevnost [2].

Při procesu lepení nastávají jevy jako je koheze a adheze. Kohezi by se dalo definovat jako sílu, která má tendenci držet pohromadě podobné molekuly. Vzájemně se přitahují a vedou k celkové pevnosti. V oblasti lepených dřevěných lepených prvků se rozlišuje koheze použitého lepidla a koheze dřevěného adherendu. Adheze je snaha částic nebo povrchů slučovat se dohromady. Při procesu lepení, kdy vzniká mezifáze (oblast, kde lepidlo proniká do pórů lepeného dřeva), se sleduje také adheze lepidla k dřevěnému adherendu (Obr. 6). Při jejím porušení nedochází k dokonalému spolupůsobení lepidla a dřevěného adherendu [15][17][19].



Obr. 6: Detail lepené spáry [20]

Adhezivní vazby můžeme dělit na dva základní typy: jedná se o konstrukční (strukturní) a nekonstrukční (nestrukturní) vazby. Konstrukční vazby se používají pro prvky, které musí být schopny přenést vyšší napětí. Od nekonstrukčních vazeb není požadováno, aby nesla zatížení, ale pouze spojila lehké materiály [17].

Lepení dvou povrchů je možné uskutečnit na základě: i) van der Waalových sil, které vykazují slabou adhezi; ii) interakce pomocí polárních skupin; iii) chemické vazby, které vykazují silnou a trvanlivou adhezi. U polárních vazeb dochází k oddělení náboje mezi atomy. Tento proces vytváří přirozený a trvalý dipól. Dva dipóly mohou interagovat, pokud se kladný a záporný konec dipólu shoduje s opačnými konci jiného dipólu. Síla této interakce závisí na správném uspořádání dipólů, v případě malých molekul v roztoku toto bývá většinou umožněno. Dřevo i lepidlo mají polární skupiny, které spolu reagují například při vytváření vodíkových vazeb. Tyto vazby přispívají pevnosti lepeného spoje. Jedním z omezení vodíkové vazby je její schopnost narušit se v přítomnosti vody a zeslábnout natolik, že poslouží jako zóna poruchy. Při tvorbě vazeb na základě polárních skupin je důležité, aby povrch neměl příliš nízkou polaritu, protože pak by kapalina nebyla schopna povrch dostatečně smočit. Dále by lepidla měla mít menší povrchové napětí než dřevo (tedy větší povrchovou energii), aby bylo dosaženo optimálního smáčení adherendu [18].

3.2 Rozdělení lepidel

Lepidla se dají dělit z hlediska několika kritérií, například podle chemického složení, zdroje výroby, fyzikální formy, reakce na vlhkost, funkce a taktéž se dají dělit na základě Eurokódu 5:

a) podle zdroje výroby – se dají lepidla rozdělovat na přírodní a syntetická. Přírodní lepidla jsou vyráběna z přírodních zdrojů organických (kasein, škrob, pryskyřice) nebo anorganických (asfalt, vodní sklo, silikáty). Použití organických lepidel je však omezené na papír, lepenku nebo fólie. Výhodou je rychlý vývin lepidlosti. Naopak nevýhodou jsou jejich nízké pevnosti a u většiny z nich i rozpustnost ve vodě. Syntetická lepidla jsou všechna jiná lepidla než přírodní. Lepený spoj se syntetickým lepidlem je odolný vůči vysokým teplotám a lepidlo se snadno používá [17][19].

b) podle reakce na změnu vlhkosti – lze lepidla rozdělit do dvou skupin: polymerizovaná a předpolymerizovaná. Polymerizovaná lepidla in situ pronikají do buněčných stěn dřeva a rozkládají bobtnající napětí přes mezifázi. Po vytvrzení vytvářejí poměrně tuhé a vysoce zesíťované polymery. Patří sem například lepidla MUF (melamin-močovino formaldehydová lepidla) nebo PRF (fenol-rezorcinol formaldehydová). Oproti tomu předpolymerizovaná lepidla, jako jsou PUR (polyuretanová) lepidla, jsou flexibilnější a umožňují rozložit napětí v lepidle, což snižuje mezifázové napětí. Mají

vysokou molekulovou hmotnost a díky tomu často ani neproniknou do buněčné stěny [15][21].

c) *podle EC5* – v současné době existuje jen jedna evropská norma klasifikující lepidla pro dřevěné konstrukční prvky – ČSN EN 301:2018. Tato norma upřesňuje technické požadavky a klasifikuje fenolická a aminová lepidla do dvou skupin:

- lepidla typu I, která jsou odolná vůči teplotám nad 50 °C a neomezené venkovní expozici (např.: PRF, MUF),
- lepidla typu II, která jsou trvanlivá při teplotách nejvýše 50 °C a krátkodobém působení povětrnosti. Používají se ve vytápěných a větraných budovách nebo ve venkovním prostředí chráněném proti povětrnosti [22].

3.3 Lepidla pro dřevěné konstrukce podle platných hEN norem

3.3.1 Lepidla na fenolické bázi (PRF, MUF)

Fenolrezorcinolformaldehydová (PRF) pryskyřičná lepidla

Tato lepidla se vyznačují tím, že vytvářejí velmi pevné vazby, které jsou odolné vůči vodě a povětrnostním vlivům. Proto se používají při výrobě vnějších dřevěných konstrukcí. PRF lepidla jsou dvousložková. Vyrábějí se polykondenzací fenolu a formaldehydu. Jako katalyzátor při této reakci se používá rezorcinol, který umožňuje tuhnutí za studena. Rezorcinol je drahá chemikálie, která se vyrábí na světě ve velmi omezeném množství, a proto je rozhodujícím faktorem pro cenu lepidel. Nevýhodou PRF je obsah alkálií, který může vést ke zvýšenému příjmu vody a zvýšení rovnovážné vlhkosti [15][23].

Melaminmočovinoformaldehydová (MUF) pryskyřičná lepidla

MUF lepidla jsou modifikací močovinoformaldehydových lepidel, která jsou lépe odolná vůči vlhkostním podmínkám. Melamin zvyšuje odolnost vůči hydrolyze díky stabilnější peptidové vazbě mezi melaminem a formaldehydem. Bohužel je melamin poměrně drahá chemikálie, a proto se jeho množství v lepidle odvíjí od způsobu použití. Do MUF lepidel určených do vnitřního prostředí se přidává 2-5 % melaminu a do lepidel pro vnější prostředí je vhodnější obsah melaminu 30 až 40 %.

MUF lepidla ve srovnání s PRF mají ale vyšší emise formaldehydu (v současné době se již vyrábějí lepidla s nižším obsahem formaldehydu). Dále se vyznačují vyššími

hodnotami modulu pružnosti, než jaké dosahují PUR lepidla. Jejich elasticita může být upravována přidáním polyvinylacetátového lepidla [15][24].

3.3.2 Emulzní polymerní izokyanatany (EPI)

Tato lepidla jsou dvousložková, kdy první složkou je polymerní emulze na vodní bázi (například polyvinylacetát) a druhou složkou je síťovací činidlo (izokyanát). EPI lepidla vytvrzují za studena, ale mohou být vytvrzována i teplem. Samotný proces vytvrzování je poměrně složitý, zahrnuje tvorbu filmu emulzního lepidla a chemickou reakci reaktivního izokyanátu vůči vodě, hydroxidovým, aminovým a karboxylovým skupinám. Výhodou těchto lepidel je vysoká odolnost proti vlhkosti a teplu. Typickým využitím je výroba masivních dřevěných desek, parket, okenních rámců, překližek a dalších materiálů.

Hlavní lepící složkou EPI lepidel je emulzní polymer, který se skládá z vody, polyvinylalkoholu (PVA), jedné nebo více emulzí na vodní bázi, plniva a řady přísad (odpěňovače, dispergátory, biocidy). PVA je v lepidle přítomný kvůli tomu, že se podílí na síťovací reakci s izokyanátem během vytvrzování, dále zabraňuje sedimentaci plniva a upravuje viskozitu. Plnivo se přidává za účelem zvýšení tepelné odolnosti vytvrzeného lepidla a pro zmírnění průniku lepidla do struktury dřeva. Nejčastěji používaným plnivem je uhličitán vápenatý [25].

3.3.3 Polyuretanová lepidla (PUR)

Polyuretanová lepidla se dělí na dvousložkové (2C-PUR) a jednosložkové (1C-PUR). Základním výrobním prvkem obou skupin je izokyanát (2C-PUR dále obsahuje polyol). Při vytvrzování nastává polyadice. Při této reakci dochází k tvorbě uretanu díky přítomnosti izokyanátových (a polyolových) hydroxylových skupin. Následnou reakcí uretanu a zbylého izokyanátu započne proces zesíťování. Výhodou těchto lepidel je poměrně vysoká pevnost, trvanlivost a tvárnost. Ve srovnání s MUF a PRF lepidly mají poměrně nižší modul pružnosti. Na druhou stranu neobsahují formaldehyd, což může mít rozhodující vliv při výběru lepidla [15][26].

Dvousložková polyuretanová lepidla (2C-PUR)

Jedná se o lepidla skládající se ze dvou složek – polyol a izokyanát. Oba komponenty systému 2C-PUR se uchovávají odděleně, míchají se krátce před lepením. To má velkou výhodu, protože pryskyřičná složka (polyol) může být jednodušeji

modifikována, a to z hlediska viskozity nebo hustoty zesíťování. Dvousložkový polyuretan se především používá při výrobě lepeného lamelového dřeva nebo při spojování masivního dřeva [26].

Jednosložková polyuretanová lepidla (1C-PUR)

Základní reaktivní složkou je izokyanát, který vytvrzuje díky vlhkostí z adherendu a okolního prostředí. To může být nevýhodou, protože při poklesu vlhkosti dřeva pod 8 % je vytvrzování nedostatečné. Jednosložkové polyuretany se často používají v kombinaci s primerem, který zlepšuje lepicí schopnosti i ve vlhkém prostředí.

Tato lepidla jsou největšími konkurenty PRF lepidel. Ve srovnání mají 1C-PUR lepidla snazší manipulovatelnost, protože není potřeba přimíchávat katalyzátory nebo tužidla. Jejich nevýhodou je samotná struktura, která má sklony k pění. To je zapříčiněno tím, že při tvrdnutí vzdušnou vlhkostí vzniká oxid uhličitý, ten po sobě v lepidle zanechává póry a kaverny [24][26].

4 Cíl práce

Předložená práce se zabývá problematikou lepení dřeva, přičemž tato problematika je v oblasti dřevěných konstrukcí velice aktuální, což je potvrzeno i zvyšujícím se podílem lepeného sortimentu. Lepený sortiment (ať už tyčové prvky BSH nebo plošné aglomerované materiály) často nacházejí uplatnění při výstavbě dřevostaveb a nosných dřevěných konstrukcí. V teoretické části jsou popsány základní aspekty týkající se procesů modifikace dřeva, kde se věnuje běžně využívaným metodám, jako je tepelná modifikace, impregnace nebo různým typům úprav povrchu dřeva. Proces modifikace byl pro teoretickou část vybrán z toho důvodu, že princip lepení těchto modifikovaných dílců/prvků může vykazovat odlišných parametrů a proces lepení takovýchto materiálů může být provedenou modifikací ovlivněn. V poslední části je provedeno shrnutí poznatků z rešerší vědeckých článků týkající se vybraných typů lepidel, která se běžně používají pro lepení dřevěných konstrukcí.

Cílem práce je bližší ověření chování lepených spojů s využitím modifikovaného 1C-PUR lepidla, kdy modifikací je myšleno jeho **záměrné plnění vybraným typem plniva**. Dalším cílem práce je ověřit, jaký bude mít na lepený spoj vliv provedení předúpravy povrchu bukového dřeva pomocí plazmatického výboje.

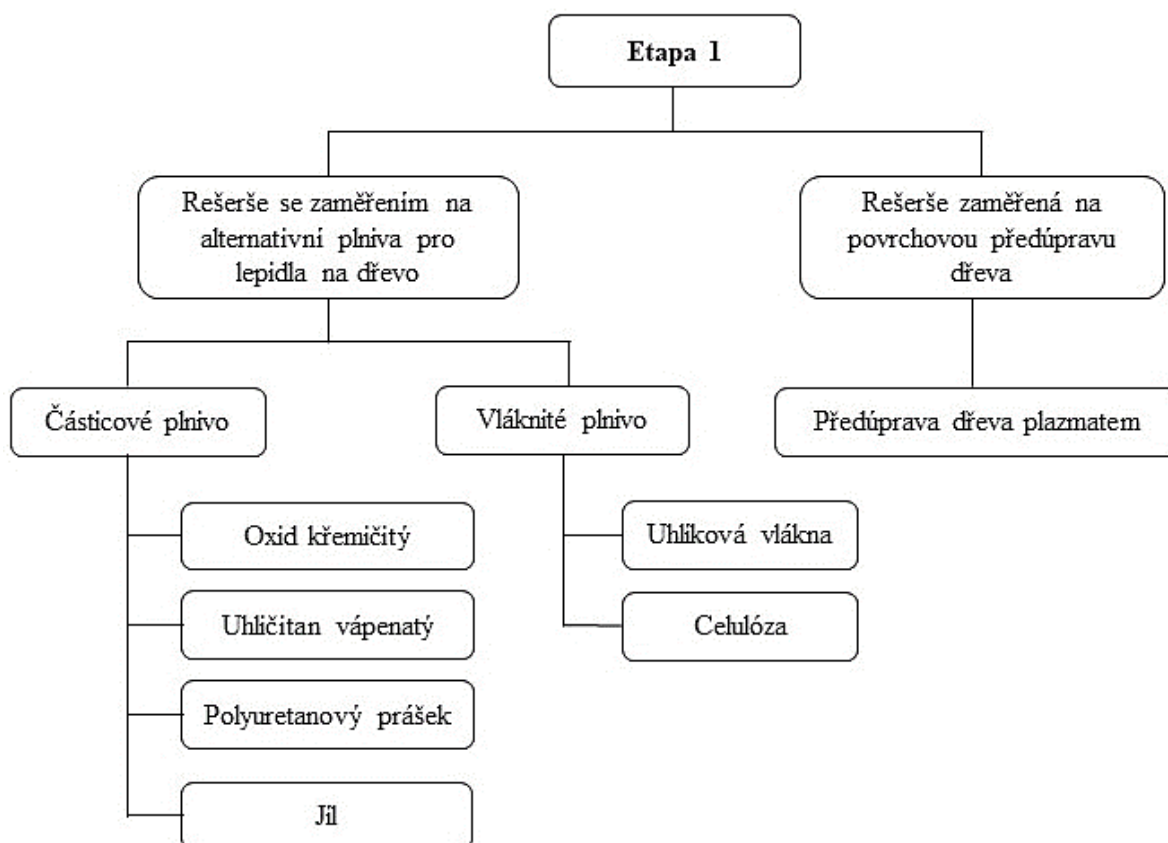
Pro toto ověření bylo dílčím cílem stanovení optimálního typu plniva, a to na základě provedené rozsáhlé rešerše poznatků týkající se alternativních plniv (částicový/vláknitý charakter) do lepidla. Tato plniva byla selektována optimalizačním procesem (Saatyho maticí), za účelem zvolení správného plniva. Dále byla provedena rešerše o vlivu předpřípravy povrchu dřeva plazmatickým výbojem na finální adhezi lepeného dřevěného spoje.

5 Metodika práce

V rámci zpracování této bakalářské práce byly jednotlivé činnosti vedoucí k dosažení vytýčených cílů rozděleny do dvou na sebe navazujících etap. Obsah jednotlivých etap řešení je schematicky uveden na Obr. 7 a Obr. 8.

Etapa 1 – Zhodnocení modifikací lepidla a úprav dřeva na základě provedené rešerše

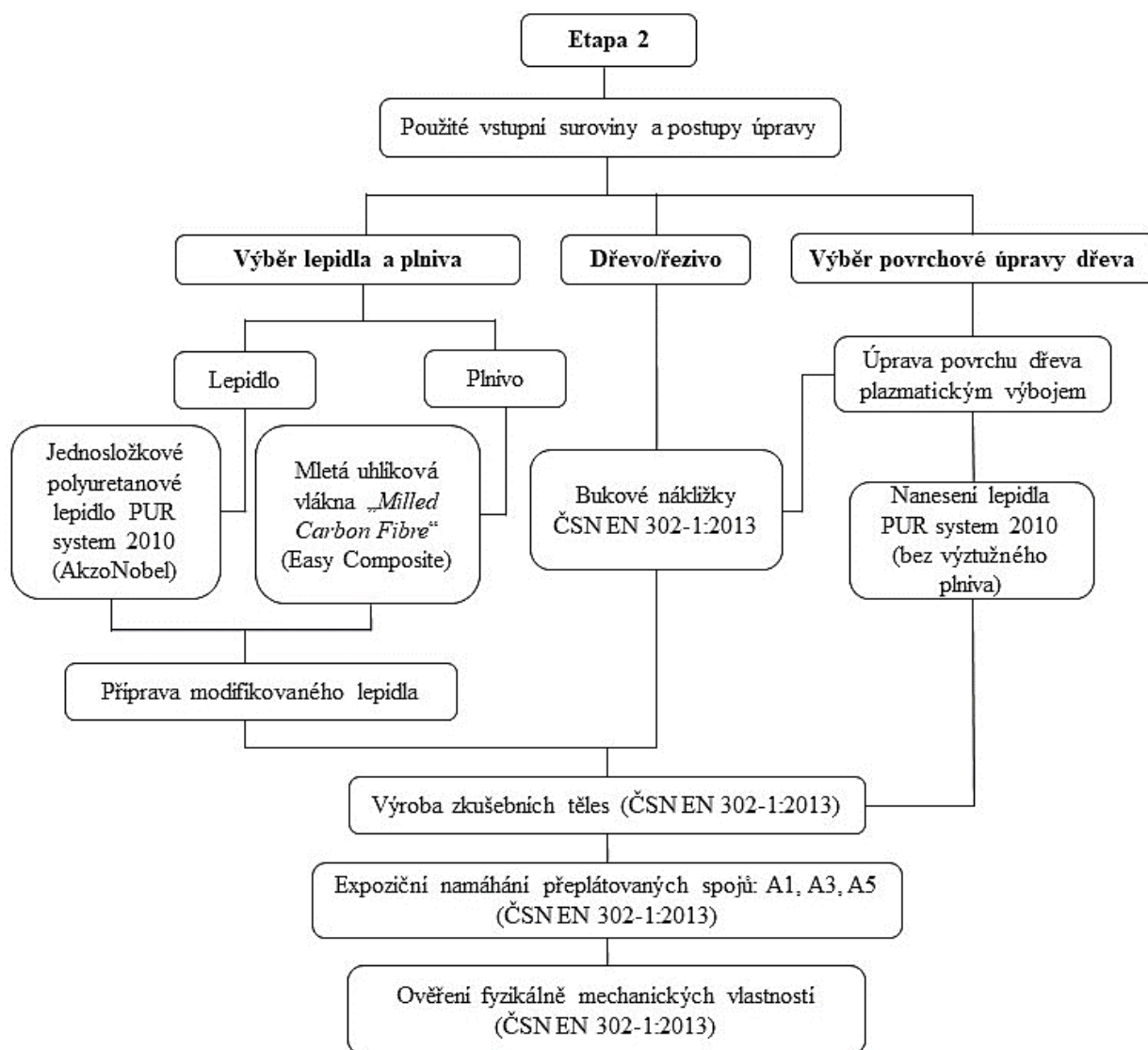
Předmětem první etapy je rešeršní část zabývající se modifikací lepidel výztužnými plnivými/vláknami a zohledněním vlivu jejich parametrů (velikost, tvar, povrchová úprava atd.) na chování daného lepidla a na jeho spolupůsobení s dřevěným adhirendem v lepeném spoji. Součástí rešerše je také analýza parametrů plazmatického výboje pro povrchovou úpravu dřeva. Výsledkem této etapy je výběr typu plniva a analýza vlivu úpravy povrchu dřeva plazmatickým výbojem. Etapa 1 je schematicky zobrazena na Obr. 7.



Obr. 7: Schématické znázornění Etapy 1

Etapa 2 – Vyhodnocení vlivu plnění lepidla a vlivu modifikace povrchu adherendu na trvanlivost lepeného spoje

Druhá etapa se zabývá výrobou plošně lepených přeplátovaných spojů dřeva a navazuje na první etapu, kde byl optimalizován typ použitého plniva a analyzována povrchová úprava dřevěného adherendu plazmatickým výbojem. Zkušební tělesa budou připravena a podrobena smykovému namáhání dle ČSN EN 302-1:2013. Dle získaných výsledků bude vyhodnoceno optimální plnění pro jednosložkové polyuretanové lepidlo a posouzen vliv předúpravy plazmatickým výbojem na parametry lepených spojů po expozičním namáhání. Je kladen důraz zejména na zvýšení smykové pevnosti při vlhkostním a hydrotermálním namáhání (expoziční A3 a A5) a také dosažení co nejvyšší míry kohezního porušení ve dřevě. Schématické znázornění Etapy 2 je na Obr. 8.



Obr. 8: Schématické znázornění Etapy 2

5.1 Zhodnocení stávajících poznatků

5.1.1 Rešeršní poznatky o modifikaci lepidel různými plniva

Lepení je jedním z klíčových kroků při výrobě moderních dřevěných kompozitních výrobků. Pro zlepšení celé řady vlastností se do lepidla přidávají plniva. Ty mohou vést ke zvýšení viskozity lepidla a zlepšení rozměrové stability nebo mechanických vlastností. Plniva snižují nežádoucí zatékání lepidla do pórů na povrchu dřeva, což snižuje potřebné množství lepidla. Jedná se často o sloučeniny neutrální nebo slabě alkalické, které obvykle nevyžadují chemickou reakci s vytvrzovacím prostředkem ani s jinými složkami. Plniva se mísí s ostatními složkami před nanesením lepidla na povrch dřeva. Celkově mohou být plniva levnými materiály pro zlepšení vlastností dřeva a pro snížení nákladů výroby [27][28].

Plniva lze rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou inertní plniva, která jsou rozptýlena v lepidle hlavně za účelem snížení nákladů. Většinou se jedná o anorganické minerální prášky, jako je například uhličitán vápenatý nebo oxid křemičitý. Druhou skupinou jsou plniva aktivní, která jsou nejčastěji organického původu a reagují s lepidlem. Řadí se mezi ně například celulóza nebo jíly [28].

Oxid křemičitý (SiO_2)

Jedná se o plniva, jejichž částice jsou nejčastěji v nano rozměrech. Oxid křemičitý je schopen vytvářet křemíkové nanostruktury, které jsou složené pouze z SiO_2 nebo tzv. hybridní nanostruktury, kde je přítomné křemíkové jádro obalené jiným materiálem. Aktivita nanooxidu křemičitého vyplývá z přítomnosti siloxanových skupin a silanolových skupin na jeho povrchu.

Křemičitá plniva se používají do řady lepidel pro zlepšení jejich vlastností. Například do melamin-močovino-formaldehydových lepidel se oxid křemičitý přidává za účelem zvýšení viskozity lepidla. Tato skutečnost může mít pozitivní vliv pro použití fenolických lepidel, protože díky tomu je zajištěna delší doba trvanlivosti tekutého lepidla. Plniva přesto ve fenolických lepidlech neovlivňují tepelnou stabilitu lepidla ani dobu zesíťování, umožňují však snížit množství energie potřebné k tomuto procesu [29].

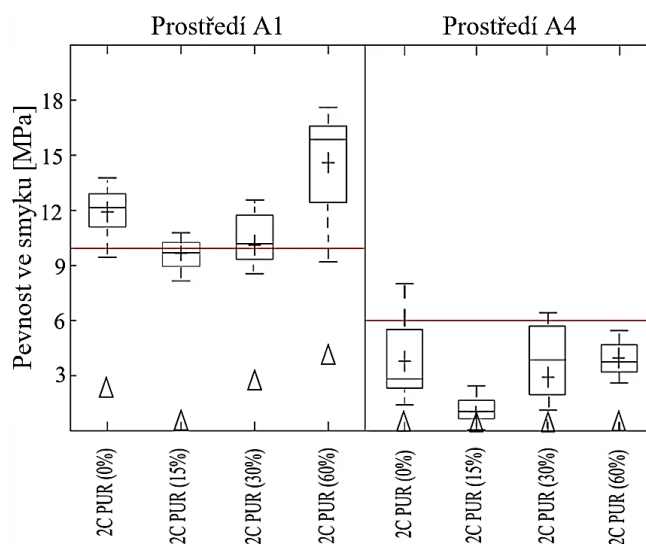
Dále se plniva oxidu křemičitého používají do polyuretanových lepidel, kde zlepšují přilnavost lepidla k povrchu dřeva. Křemičitá plniva zpomalují v polyuretanovém lepidle proces vytvrzování díky vodíkové vazbě mezi polyolovou molekulou lepidla a plniva. PUR lepidla v kombinaci s nanočásticemi SiO_2 byla

předmětem mnoha studií, ve kterých bylo prokázáno, že se mechanické vlastnosti těchto lepidel zvyšují [27].

Uhličitan vápenatý (CaCO_3)

Uhličitan vápenatý je bílý prášek, který je v průmyslu velmi využívaný jako plnivo do lepidel díky jeho nízké ceně, netoxicitě, široké dostupnosti a snadnému míchání v lepidlech. Velikosti částic CaCO_3 musí být srovnatelná s částicemi lepidla, aby byla zajištěna jeho hladkost. Přidání CaCO_3 do lepidel může zvýšit jejich mechanické vlastnosti, průhlednost spojů a vede k lepší odolnosti proti UV záření. Taktéž snižuje náklady na lepidlo tím, že zmírňuje hloubku průniku lepidla do dřevní hmoty [27][28].

Uhličitan vápenatý se často přidává do 2C-PUR lepidel. Zde se nejprve přidává k pryskyřičné složce (polyolu) a až poté se smíchají i s druhou složkou (izokyanátem). Přidání CaCO_3 prášku do lepidla vede k vyšší pevnosti ve smyku. Bylo však zjištěno, že tato hodnota je ovlivněna množstvím přidaného plniva a prostředím, ve kterém se nachází. Na Obr. 9 je viditelný vzrůst pevnosti ve smyku lepeného bukového dřeva ve standardním klimatickém prostředí A1 (20 ± 2 °C s relativní vlhkostí 65 ± 5 %) a naopak pokles pevnosti po expozici v hydrotermálním prostředí A4 (6 hodin ve vroucí vodě, následně 2 hodiny ve vodě o teplotě 20 ± 5 °C).



Obr. 9: Závislost pevnosti ve smyku na množství uhličitanu vápenatého v 2C-PUR v daných prostředích [30]

Tyto vzorky byly vystaveny expozičnímu namáhání a podrobeny zkoušce pevnosti ve smyku dle normy ČSN EN 302-1:2013. Dále také bylo zjištěno, že lepené spoje v přítomnosti uhličitanu vápenatého vykazují nižší pevnost v tahu a modul pružnosti [30].

Uhlíková vlákna

Uhlíkové nanotrubicice mohou být jednostěnné nebo víceštěnné. Jednostěnné nanotrubicice mají tendenci se sestavovat do lan. Vícestěnné nanotrubicice se skládají ze soustředných jednostěnných nanotrubic, které drží pohromadě vlivem slabých van der Waalových sil. Metody pro syntézu uhlíkových nanotrubic zahrnují obloukový výboj, katalytický růst oxidu uhelnatého v plynné fázi, laserovou ablaci a chemickou depozici par z uhlovodíků [31].

Tato uhlíková plniva mají vynikající mechanické vlastnosti. Jejich zavedení do lepidla vytváří strukturu výztuže, což vede k lepší pevnosti, tepelné stabilitě, modulu pružnosti a vyššímu elastickému namáhání. Bohužel u těchto plniv může nastat špatná disperze uhlíkových nanotrubic (CNT) v lepidle a mechanické vlastnosti se výrazně nezlepší. Aby se CNT lépe dispergovaly, může je roubování velkých molekul (například proteinu) přinutit k jejich oddělení. Jejich pořizovací náklady jsou poměrně vysoké [32].

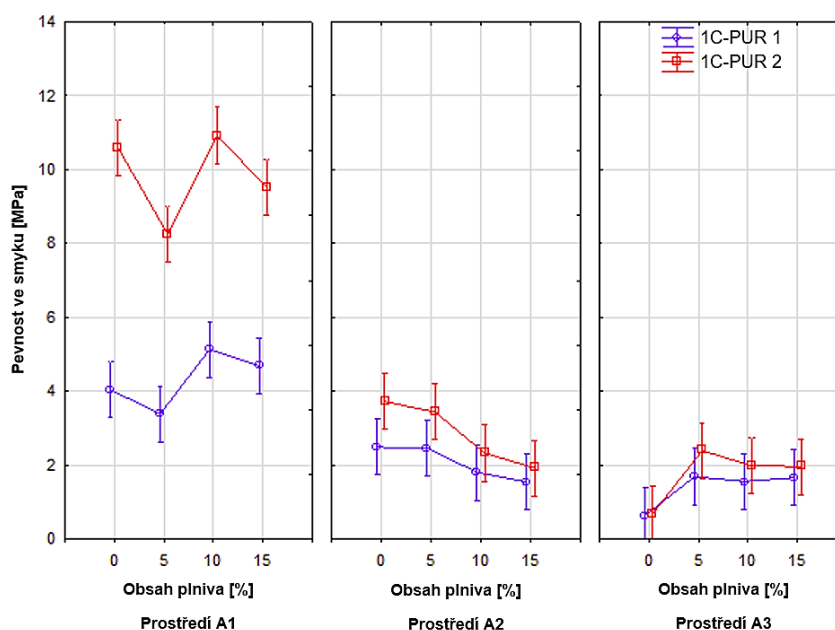
Uhlíková vlákna je možné dále mechanicky drtit nebo mlít. Vzniklý produkt se nazývá mleté uhlíkové vlákno, které má obvykle délku do 100 μm . Velkou výhodou mletých vláken je jejich snazší dispergace v lepidle [33].

Polyuretanový prášek

Polyuretanový prášek jako plnivo do lepidel se získává recyklací tuhé PUR pěny, která se používá například jako tepelný a akustický izolační materiál. Skutečnost, že se prášek vyrábí recyklací má velkou výhodu z ekonomického. PUR prášek se může využívat jako inertní nebo také jako aktivní plnivo. V obou případech jde hlavně o snížení nákladů na lepidlo a o efektivní zpracování odpadu [35].

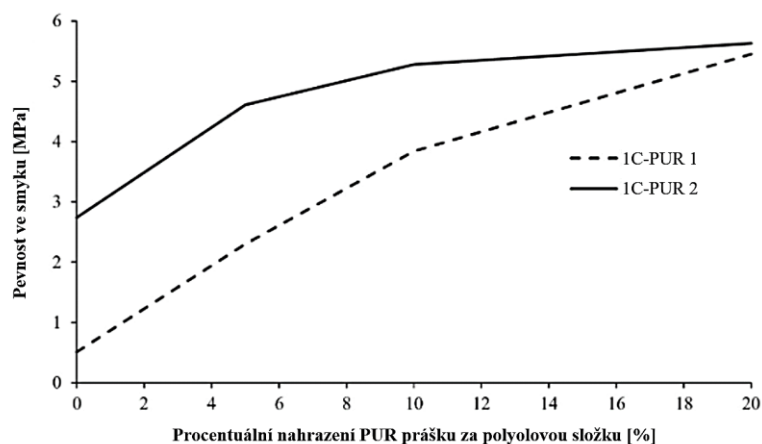
PUR prášek jako inertní plnivo se používá například v kombinaci s lepidly na fenolické bázi, kde zlepšuje fyzikální vlastnosti a odolnost lepicí směsi vůči vodě. Taktéž může být v kombinaci s 1C-PUR lepidly, kde s rostoucím množstvím plniva zvyšuje viskozitu a trvanlivost lepených spojů dřeva při hydrotermálním namáhání. Existuje řada studií, ve kterých byly studovány vlivy množství PUR prášku a podmínek prostředí na smykovou pevnost lepeného spoje. Na Obr. 10 jsou právě tyto vlivy viditelné na dvou různých 1C-PUR lepidlech, která byla aplikována na vzorky bukového dřeva. Obě použitá lepidla vytvrzují vlhkostí a navzájem se liší molární hmotností a množstvím použitých surovin. První část vzorků byla vystavena standardním klimatickým podmínkám při teplotě 20 °C s relativní vlhkostí 65 % po dobu sedmi dnů (prostředí A1).

Druhá sada vzorků byla po sedmi dnech vytažena ze standardního prostředí a byla ponořena na 4 dny do vody při teplotě $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ a poté okamžitě testována (prostředí A2). Poslední sada vzorků byla po 7 dnech vytažena ze standardních podmínek a byla ponořena na 6 hodin do vroucí vody a poté umístěny do vody při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 2 hodin a následně zkoušena (prostředí A3) [35].



Obr. 10: Závislost pevnosti ve smyku na množství polyuretanového prášku v 1C-PUR v daných prostředích [35]

Aktivní PUR plniva se používají jako částečná náhrada za polyolovou složku v polyuretanových lepidlech. Bylo zjištěno, že prášek vykazuje určitou reaktivitu, díky které by mohla být snížena dávka polyolu v PUR lepidle. Tato modifikace přináší vyšší viskozitu lepidla a lepší pevnosti lepeného spoje. Na Obr. 11 je patrné, že u dvou různých 1C-PUR lepidel se zvyšuje pevnost ve smyku s přibývajícím množstvím PUR plniva [34].



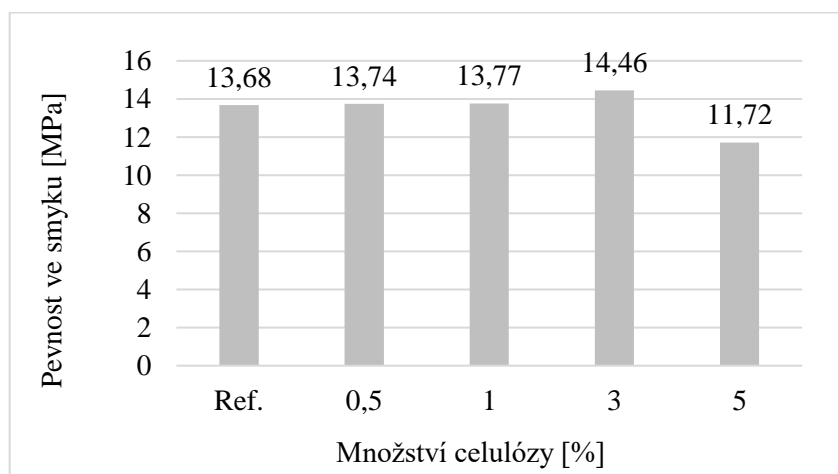
Obr. 11: Závislost pevnosti ve smyku na množství PUR prášku v 1C-PUR [34]

Celulóza

Celulózová nanovláknna se získávají ze dřeva, bavlny, konopí a dalších rostlinných materiálů, kde celulóza slouží jako výztužná fáze. Použití tohoto plniva má řadu výhod jako je například biologická rozložitelnost, obnovitelnost, netoxicity, nízká hmotnost a dobré mechanické vlastnosti. Jejich výroba je poměrně složitá. Skládá se z chemické předúpravy a mechanického zpracování. Procesy spadající do chemické předúpravy mohou být alkalické, oxidační nebo enzymatické. Mechanické zpracování se provádí rafinací a vysokotlakou homogenizací, mletím nebo kryodrcením [36].

Nanocelulóza může být použita jako plnivo do různých lepidel. Například v kombinaci s polyuretany dochází k interakci mezi polárními skupinami celulózy a PUR, což vede ke zlepšení mechanických vlastností. Konkrétně s přibývajícím množstvím plniva se zvyšuje pevnost v tahu a modul pružnosti. Dále se nanocelulóza může přidávat jako plnivo do močovinoformaldehydových lepidel. Zde opět vzniká chemická vazba mezi lepidlem a plnivem, která vede ke zvýšení pevnosti ve smyku. Řada studií se věnovala právě pevnosti ve smyku v závislosti na obsahu plniva u močovinoformaldehydových lepidel [37].

Ve studii zaměřené na plnění UF lepidla celulózou byl ověřen její vliv na základě smykových pevností bukových lamel. Před zkouškou byly vzorky stabilizovány ve standardních klimatických podmínkách (20 ± 2 °C s relativní vlhkostí 65 ± 5 %). Na Obr. 12 je patrný výsledný vliv celulózového plniva. Optimální je množství plniva do 3 %, protože větší dávky způsobovaly pokles pevností. Je tomu tak z důvodu zvýšeného množství vody z celulózové suspenze nebo vysoké měrné plochy povrchu, která ovlivňuje reologické chování a vytvrzovací vlastnosti lepidel [38].

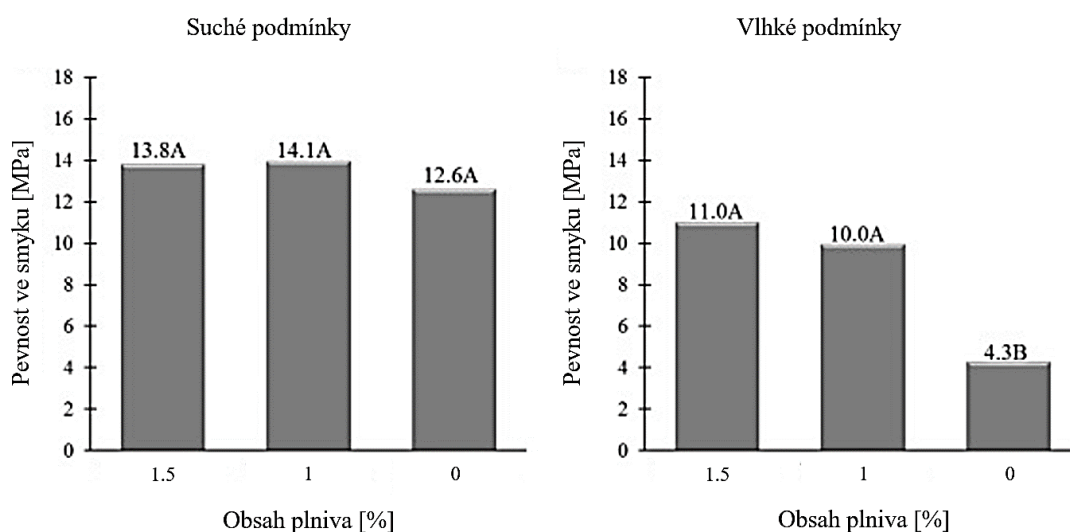


Obr. 12: Závislost pevnosti ve smyku na množství celulózy v UF lepidle [38]

Jíl

Surové jíly musí být před použitím do lepidla jako plnivo modifikovány. Je to z důvodu jejich hydrofilní povahy a příliš velkých částic, které by nedokázaly řádně reagovat s polymerní matricí lepidla. Povrchová modifikace se uskutečňuje za účelem zajištění interakce mezi povrchem jílu a polymerními složkami. Proces se provádí iontovou výměnou kationtů (sodíku, vápníku) v prostoru mezi vrstvami za povrchově aktivní látky (amonné nebo fosfoniové látky) [28].

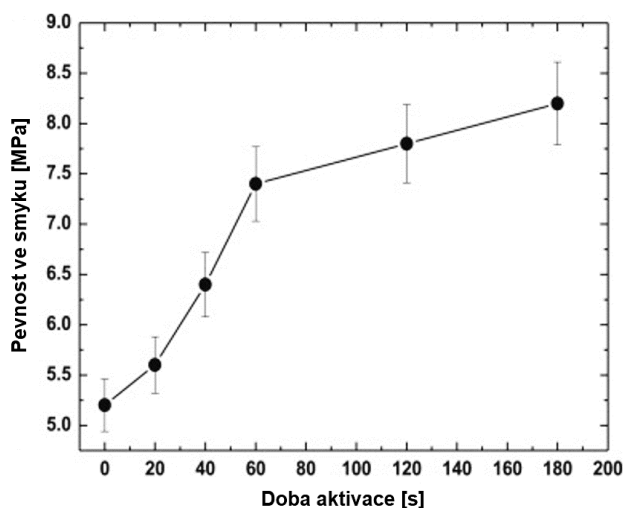
Nanojíl jako plnivo do močovinoformaldehydových lepidel způsobuje zvýšení viskozity v závislosti na obsahu plniva. Také byl prokázán vzrůst pevnosti ve smyku, ale jen ve vlhkých podmínkách. V suchých podmínkách se výrazně neliší pevnost ve smyku lepidla s plnivem a bez něj. Tato skutečnost je znázorněna na Obr. 13. Zde byla jedna sada vzorků uchována ve standardních podmínkách 20 °C s relativní vlhkostí 60 % po dobu dvou týdnů (suché podmínky). Druhá sada vzorků byla ponechána 24 hodin ve vodě s teplotou 20 °C (vlhké podmínky). Dále dochází ke zvýšení tepelné stability, což je přičítáno disperzi silikátových vrstev, které brání difuzi tepla do makromolekul lepidla [39].



Obr. 13: Závislost pevnosti ve smyku na množství jílu v UF lepidle v daných prostředích [39]

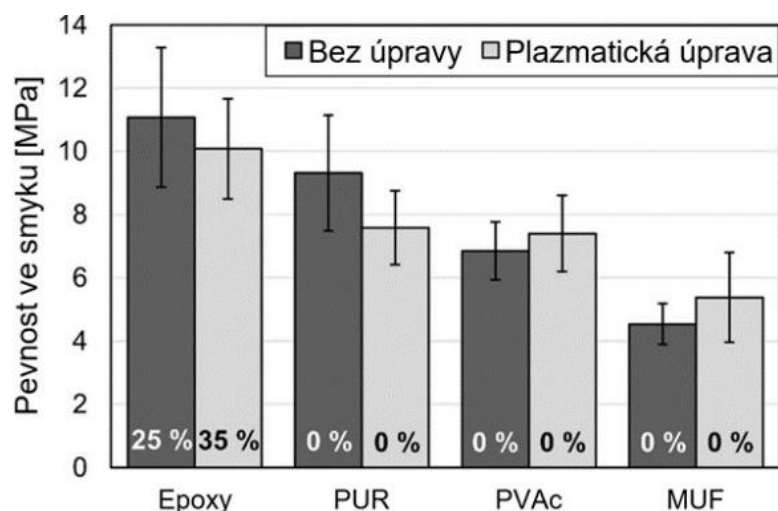
5.1.2 Předúprava dřeva plazmatem

Aplikace studené plazmy je v současné době účinnou a ekologickou metodou pro modifikaci povrchových a adhezivních vlastností dřeva. Účinky plazmové úpravy jsou omezeny na několik nanometrů pod povrchem substrátu a neovlivňují tak objemové vlastnosti dřeva. Tato úprava vede k lepším povrchovým vlastnostem, jako je smáčivost a adheze. Pomocí plazmové úpravy lze zvýšit či snížit přilnavost a tím regulovat spotřebu lepidel. Povrchové vlastnosti dřeva však závisí na délce působení plazmy na povrch dřeva a také na typu použitého lepidla. To je viditelné na Obr. 14, kde byl na vzorek bukového dřeva použit radiofrekvenční výboj o zdrojovém výkonu 300 W. Výsledkem bylo zvýšení pevnosti ve smyku lepeného spoje vodou ředitelným polyuretanovým lepidlem [1][3].



Obr. 14: *Závislost pevnosti ve smyku na době povrchové úpravy plazmatem [3]*

Důvodem zvýšené adheze plazmatickým výbojem je, že se na povrchu dřeva začnou vytvářet skupiny, které obsahují kyslík. Těmito skupinami jsou například hydroxylové nebo karboxylové skupiny. Vzhledem k polárnímu charakteru většiny těchto skupin vede plazmová úprava k silnému zvýšení polární složky volné povrchové energie, tedy ke zvýšení hydrofility. Bohužel zvýšení adheze nenastává ve všech případech. Existují studie, které uvádějí pokles adheze lepidla po plazmatické úpravě. V konkrétní studii (Obr. 15) bylo zjištěno, že pevnost ve smyku se po dielektrickém bariérovém výboji na bukové dřevo mírně zvyšuje jen u lepidel na vodní bázi (PVAc, MUF). U ostatních lepidel (Epoxy, PUR) docházelo spíše k poklesu pevností [40][41].



Obr. 15: Pevnost ve smyku s/bez povrchové úpravy plazmatickým výbojem [41]

5.2 Experimentální ověření trvanlivosti lepeného dřeva

5.2.1 Použité materiály

Lepidlo

Jako adhezivo bylo použito jednosložkové polyuretanové lepidlo Casco PUR System 2010 (AkzoNobel, Švédsko) na báze izokyanátu MDI. Technické parametry uvedené v Tab. 1 jsou převzaty z technických listů od výrobce lepidla.

Tab. 1: Technické parametry IC-PUR

Kritéria	Parametry
Barva	Bílá
Viskozita	6000-12000 mPa.s
Sušina	100 %
Informace o emisích formaldehydu	Lepidlo neobsahuje žádný formaldehyd
Hustota	1160 kg/m ³
Nános lepidla	140-250 g/m ²
Lisovací tlak	0,8 MPa

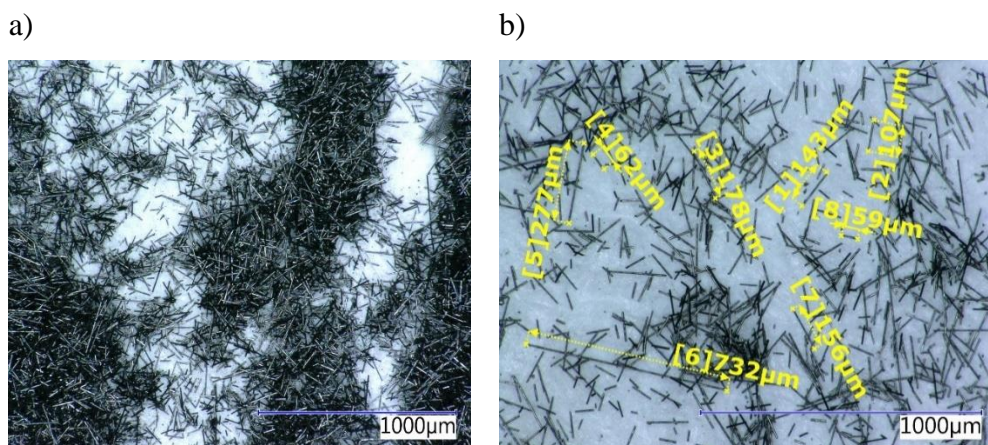
Plnivo

Pro účely experimentu bylo použito plnivo v podobě mletých uhlíkových vláken ve formě prášku (Easy Composites Ltd., Londýn). Technické parametry uhlíkových vláken jsou uvedeny v Tab. 2, které byly získány z technického lisu od výrobce.

Tab. 2: *Technické parametry uhlíkových vláken*

Kritéria	Parametry
Barva	Černá
Formát	Prášek
Průměr vláken	7,5 μm
Délka vláken	100 μm
Hustota	1800 kg/m ³
Pevnost v tahu	3150 MPa
Modul v tahu	200 GPa
Hrubá hmotnost	0,065 kg

Na Obr. 16 jsou mikrosnímky použitého plniva ve formě uhlíkových vláken. Vlákna jsou vyrobena z recyklovaných vláken bez povrchové úpravy. Dle doporučení výrobce jsou vlákna do lepidla přidávána s cílem zlepšit mechanické vlastnosti lepidla a také spolupůsobení lepidla a dřevěného adherendu v případě vlhkostního a hydrotermálního namáhání.



Obr. 16 a) uhlíková vlákna, b) délky uhlíkových vláken

Dřevina

Pro experimentální část byla použita dřevina buk lesní (*Fagus sylvatica*). Objemová hmotnost na vzduchu vyschlé dřeviny je 720 kg/m³. Použité náklížky bukového dřeva měly při lepení vlhkost 6–7 %. Zkušební vzorky byly připraveny dle ČSN EN 302-1:2013 [42].

Povrchová úprava dřeva – plazmatický výboj

Pro povrchovou úpravu plazmatem byl použit přístroj Lifetech VF700 s koplánárním bateriovým výbojem (Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská

fakulta) (viz Obr. 17). Délka působení na povrch dřeva byla 10 sekund s výkonem 200 W a 9 kHz.



Obr. 17 : *Zařízení pro aplikaci plazmatického výboje Lifetech VF700*

5.2.2 Příprava a výroba zkušebních těles

Výchozím prvkem pro výrobu zkušebních těles byly bukové desky o rozměru 145×460 mm a tloušťce 5 mm. Před nanesením lepidla byly desky obroušeny brusným papírem (hrubost P100), na části zkušebních těles byla připravena předúprava povrchu plazmatickým výbojem. Na připravené desky bylo oboustranně naneseno lepidlo (1C-PUR) v množství 250 g/m² s odpovídající dávkou plniva (uhlíková vlákna), jejichž navážky jsou uvedeny v Tab. 3. Lepení proběhlo při teplotě 20 °C s relativní vlhkostí 65±5 %. Takto nachystané slepence byly zalisovány tlakem 0,8 MPa po dobu 30 minut. Následně z lepených desek byly vyřezány zkušební tělesa o rozměrech 20×150 mm, u kterých byla vymezena smyková plocha o velikosti 10×20 mm prořezáním drážky kolmo k lepené spáře. Řez byl proveden tak, aby bylo prořezáno dřevo, ale ne lepidlo. Tvar a rozměry zkušebních těles odpovídají normě ČSN EN 302-1:2013 a jsou patrné na Obr. 18.



Obr. 18: Zkušební tělesa před zkouškou a po zkoušce smykové pevnosti

V následující Tab. 3 jsou uvedeny směsi lepidel použitých k přípravě lepených spojů: referenční (Ref), směsi s určitým množstvím uhlíkových vláken (CF) a směsi, u kterých byla provedena předúprava povrchu dřeva plazmatickým výbojem s určitým množstvím uhlíkových vláken (PTCF).

Tab. 3: Složení jednotlivých směsí lepidel

Označení vzorku	Úprava povrchu dřeva	Množství lepidla [g]	Obsah plniva [%]	Množství plniva [g]
Ref	-	16,75	-	-
CF 1%		16,75	1	0,17
CF 3%		16,75	3	0,50
CF 5%		16,75	5	0,80
PTCF 1%	Plazmatická úprava	16,75	1	0,17
PTCF 3%		16,75	3	0,50
PTCF 5%		16,75	5	0,80

5.2.3 Expoziční namáhání přeplátovaných spojů

Připravené zkušební vzorky z každé směsi byly vystaveny prostředí aklimatizace (A1) a vybraným expozičním prostředím (A3 a A5), kterých podmínky expozice jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4: Expoziční namáhání vzorků [42]

Značení	Ošetření
A1	Kondicionování ve standardním klimatu (20 ± 2) °C, (65 ± 5) %
A3	4 dny máčení ve vodě o teplotě (20 ± 5) °C Regenerace ve standardním klimatu (20 ± 2) °C, (65 ± 5) % Vzorky zkoušené v suchém stavu
A5	6 hodin máčení ve vařící vodě 2 hodiny máčení ve vodě o teplotě (20 ± 5) °C Regenerace ve standardním klimatu (20 ± 2) °C, (65 ± 5) % do důvodní hmotnosti

5.2.4 Ověření fyzikálně mechanických vlastností

Po stabilizaci vlhkosti byly vzorky podrobeny stanovení smykové pevnosti při tahovém namáhání dle normy ČSN EN 302-1:2013. Tato zkouška byla provedena na zkušebním lise Testometric M350-20CT (viz Obr. 19) a rychlost zatěžování byla zvolena 3 mm/min. Díky zkušebnímu zařízení byla získána síla při porušení tělesa a následně stanovena pevnost ve smyku f_v . Výsledná hodnota smykové pevnosti byla stanovena jako průměrná hodnota z deseti platných měření.



Obr. 19: Zařízení pro stanovení smykové pevnosti lisu Testometric M350-20CT

6 Výsledky a diskuse

6.1 Etapa 1 – Zhodnocení modifikací lepidla a úprav dřeva na základě provedené rešerše

Optimalizační proces různých typů plniv pro modifikaci lepidel

Tvarový index

Z hlediska tvaru lze plniva rozdělit na částice a vlákna. Obě skupiny mají řadu pozitivních vlastností, které se využívají pro různé účely v lepidlech. Částice mají především funkci plnicí, kdy snižují nadměrný průnik lepidla do struktury dřeva. Vlákna mohou mít vliv spíše na mechanické vlastnosti, jako je například pevnost v tahu, modul pružnosti a tažnost. Důležitou vlastností lepidla je viskozita, která může být zvýšena nebo snížena v závislosti na typu plniva. Vysoký měrný povrch částic, může způsobit vyšší

hodnotu viskozity, proto je v určitých případech lepší zvolit vlákna s nižším měrným povrchem.

Udržitelný charakter plniva

Zdroje pro výrobu plniv jsou buď neobnovitelné nebo obnovitelné. Mezi neobnovitelné zdroje můžeme zařadit suroviny pro výrobu SiO_2 nebo CaCO_3 . Naopak celulózu můžeme zařadit mezi obnovitelné zdroje, což je výhodou z hlediska udržitelnosti. Speciálním případem obnovitelných zdrojů je polyuretanový prášek, který se získává recyklací polyuretanové pěny.

Technologická náročnost úpravy plniva

V některých případech se provádí předúprava plniva. Je to z důvodu zlepšení některých jejích vlastností a zachování charakteru lepidla. Většinou tyto úpravy nejsou povinností, spíše výhodou. Za nutnou úpravu by se daly považovat modifikace organických plniv jako je celulóza nebo jíly. Jejich hydrofilní charakter by mohl způsobovat objemové změny ve struktuře lepidla. Další úpravy se týkají spíše dispergace nebo agregace v lepidle.

Dostupnost

Při výběru plniva je nutné uvážit i jeho dostupnost. Některá plniva jsou více přístupnější nežli jiná, tudíž se i od toho odvíjí jejich cena.

Cena

Cena je rozhodujícím kritériem při výběru plniva. Odvíjí se od čistoty, velikosti a objemu částic či vláken. Dále záleží na technologii výroby, dostupnosti zdroje, ze kterého se získávají, nebo na poptávce na trhu. Uvedené ceny v Tab. 5 jsou stanoveny jako průměrné hodnoty cen získaných z volně přístupných databází.

Tab. 5: Dostupnost, cena a rozměry vybraných plniv

Varianta	Typ plniva	Dostupnost	Cena [€/kg]	Rozměr částice/vlákna [nm]
A	SiO_2	Orisil, Ltb (UK)	13	12
B	CaCO_3	Omya (AT)	6-12	50-12500
C	Uhlíkové vlákno	Arkema (FR)	1480	100-10000
D	Polyuretanový prášek	-	-	50000
E	Celulóza	Aldrich Sigma	300-400	20-2000
F	Jíl	BYK Additives (DE)	220-250	13000

Optimalizační proces:

Tab. 6: Hodnocení jednotlivých kritérií

Číslo	Kritérium	Jednotka	Hodnocení
1	Tvarový index	[-]	[1 - 3]
2	Udržitelný charakter plniva	[-]	[1 - 3]
3	Technologická náročnost úpravy plniva	[-]	[1 - 3]
4	Dostupnost	[-]	[1 - 3]
5	Cena	[€/kg]	[1 - 3]

Tab. 7: Rozhodovací matice (Saatyho metoda)

Číslo	Optimum	A	B	C	D	E	F	Min	Max
1	max	1	1	3	2	2	1	1	3
2	max	3	3	2	1	2	3	1	3
3	min	2	2	3	3	2	2	2	3
4	max	2	3	2	3	3	3	2	3
5	min	1	1	3	1	2	2	1	3

Saatyho škála preferencí:

1 = rovnocennost

3 = slabá preference

5 = silná preference

7 = velmi silná preference

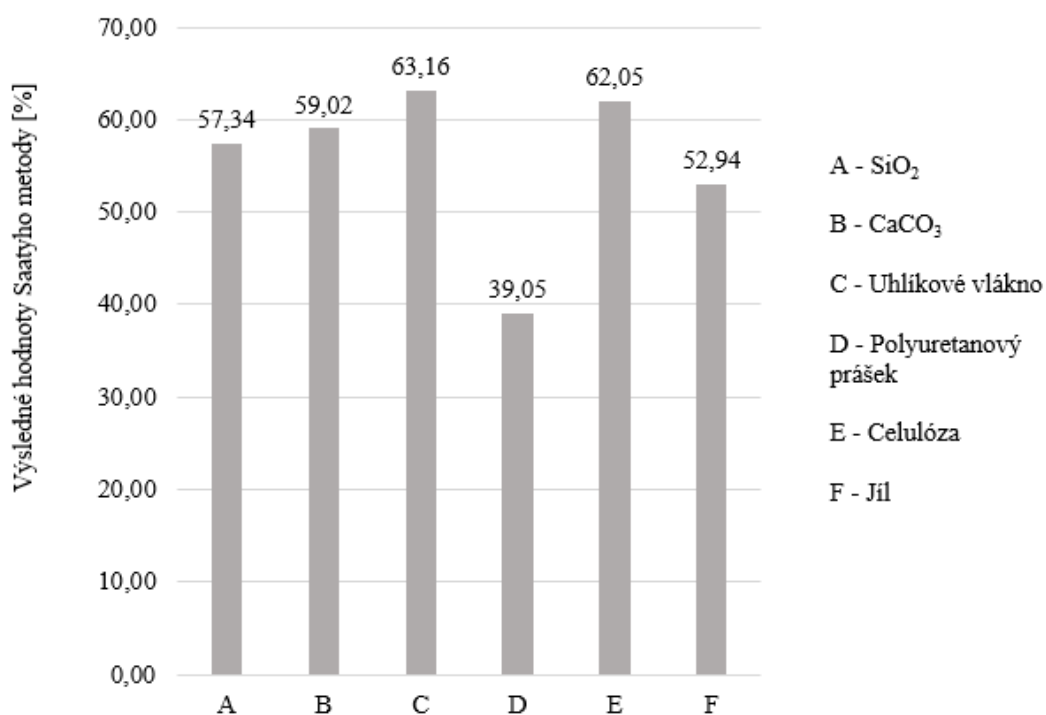
9 = absolutní preference

Tab. 8: Výpočet zvolené váhy (Saatyho metoda)

Číslo	1	2	3	4	5	Geometrický průměr	Váha
1	1	3	3	9	7	3,553993358	0,470561223
2	1/3	1	3	7	7	2,177906424	0,288362472
3	1/3	1/3	1	3	5	1,107566343	0,146645680
4	1/9	1/7	1/3	1	1/5	0,254046747	0,033636683
5	1/7	1/7	1/5	5	1	0,459156550	0,060793942
SUMA						7,552669422	1,000000000

Tab. 9: Výsledky rozhodovací matice (Saatyho metoda)

Číslo	Optimum	A	B	C	D	E	F
1	max	0,0000000	0,0000000	47,0561223	23,5280611	23,5280611	0,0000000
2	max	28,8362472	28,8362472	14,4181236	0,0000000	14,4181236	28,8362472
3	min	14,6645680	14,6645680	0,0000000	0,0000000	14,6645680	14,6645680
4	max	1,6818341	3,3636683	1,6818341	3,3636683	3,3636683	3,3636683
5	min	12,1587885	12,1587885	0,0000000	12,1587885	6,0793942	6,0793942
SUMA		57,34	59,02	63,16	39,05	62,05	52,94

**Graf 1:** Grafické znázornění rozhodovací matice

V rámci experimentální části byl realizován optimalizační proces pro výběr nejvhodnějšího typu plniva. Vybrané charakteristiky a jejich váhy byly zvoleny na základě momentálních ekologických a ekonomických kritérií. Dle vyhodnocení optimalizačního procesu lze za nejvhodnější plnivo považovat uhlíková vlákna. Jejich poměrně vysokou cenu vyvažují ostatní velmi dobré vlastnosti (možná výroba recyklací, pravděpodobné zlepšení mechanických vlastností lepených spojů, tepelně stabilnější lepené spoje). Za nejméně vhodné plnivo dle rozhodovací matice lze považovat polyuretanový prášek. I přes jeho dlouhodobou udržitelnost neodpovídají zbylé vlastnosti momentálně požadovaným kritériím.

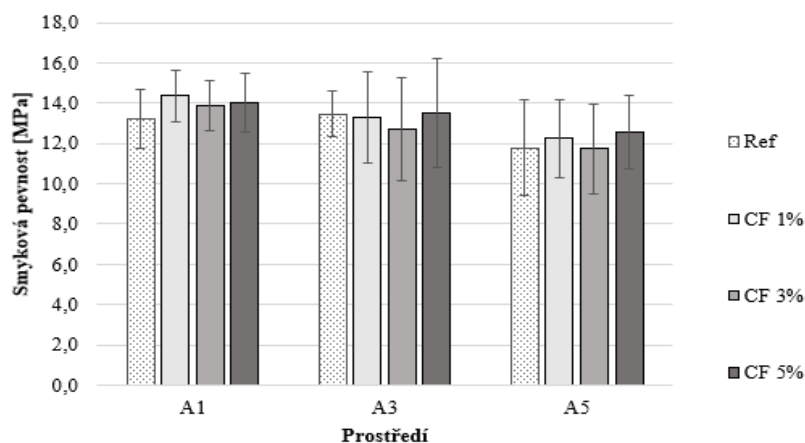
6.2 Etapa 2 – Vyhodnocení vlivu plnění lepidla a vlivu modifikace povrchu adherendu na trvanlivost lepeného spoje

6.2.1 Ověření vlivu plnění PUR lepidla

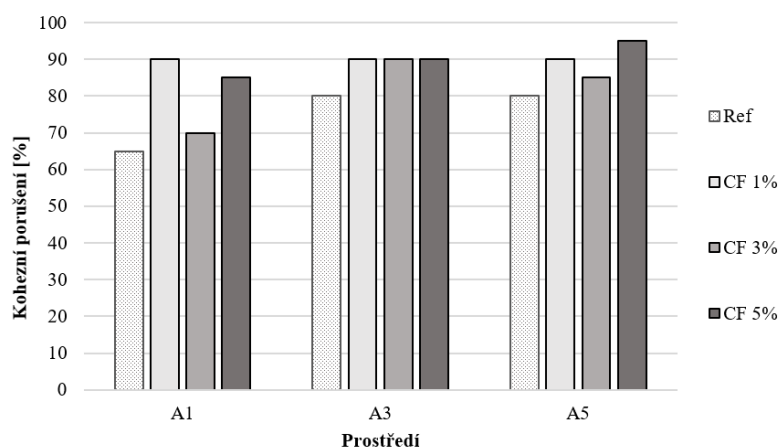
Výsledky provedených zkoušek smykových pevností bukových slepenců lepených lepidlem 1C-PUR podle ČSN EN 302-1:2013 jsou uvedeny v následující Tab. 10 a jsou znázorněny na Graf 2 a Graf 3. Jedná se o průměrné hodnoty z 10 platných výsledků smykových pevností a průměrné hodnoty jejich kohezního porušení, které bylo vizuálně posouzeno po provedené zkoušce.

Tab. 10: Průměrné hodnoty smykových pevností a kohezního porušení

Expoziční prostředí	Značení	Smyková pevnost [MPa]		Kohezní porušení [%]
		Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
A1	Ref	13,2	1,5	65
	CF 1%	14,4	1,3	90
	CF 3%	13,9	1,2	70
	CF 5%	14,0	1,5	85
A3	Ref	13,5	1,1	80
	CF 1%	13,3	2,3	90
	CF 3%	12,7	2,5	90
	CF 5%	13,5	2,7	90
A5	Ref	11,8	2,4	80
	CF 1%	12,3	1,9	90
	CF 3%	11,7	2,2	85
	CF 5%	12,5	1,8	95



Graf 2: Závislost smykové pevnosti na expozičním prostředí



Graf 3: Závislost kohezního porušení na expozičním prostředí

Dle naměřených hodnot bylo zjištěno, že uhlíková vlákna (CF) jako plnivo do 1C-PUR lepidla **nevykazují významný vliv** na smykovou pevnost lepeného spoje. Jednotlivé průměrné hodnoty smykových pevností se nelišily o více jak 1,0 MPa. Výrazné zlepšení bylo zjištěno na míře kohezního porušení, kde lepené spoje obsahující plnivo dosahovaly vyšších hodnot kohezního poškození svědčící o řádné adhezi spoje. V prostředí A1 se výsledky referenčního vzorku a vzorku s 1 % plniva lišily až o 25 %. Po hydrotermálním namáhání výsledky smykových pevností u lepidla s 5 % plniva vzrostly o 15 % v porovnání s referenčními vzorky. Principiálně lze provést srovnání efektu účinnosti s jiným vláknitým plnivem (celulózou), které bylo aplikováno do UF lepidla. Toto porovnání s celulózovými vlákny je možné provést pouze v prostředí A1. V případě použití uhlíkových vláken se pevnost zvyšovala s množstvím plniva, u celulózových vláken byl trend opačného charakteru. To lze přisuzovat skutečnosti, že celulózová vlákna spíše plniva roli plniva, nikoliv vlákna, pro zajištění vyšší viskozity, u

uhlíkového vlákna vzrůstající pevnost svědčí o ověření vlivu vlákna na pevnost lepeného spoje. Nejvýraznější rozdíl byl v 5 % plnění, kdy uhlíková vlákna dosáhla výrazně vyšší hodnoty než vlákna celulózová, protože neovlivnila tvrdnutí lepidla ve stejné míře jako celulózová [38].

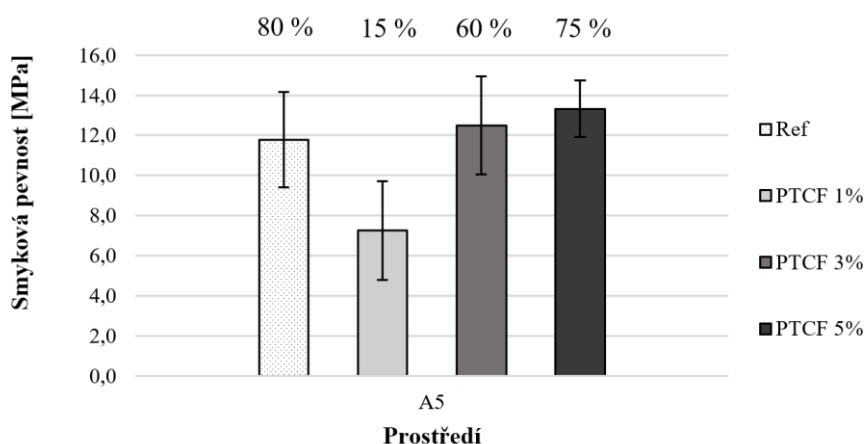
6.2.2 Ověření vlivu předúpravy dřeva

Výsledky provedených zkoušek smykových pevností bukových slepenců lepených lepidlem 1C-PUR při provedené plasmatické předúpravě povrchu podle ČSN EN 302-1:2013 jsou uvedeny v následující Tab. 11. Jedná se o průměrné hodnoty z 10 platných výsledků smykových pevností a průměrné hodnoty jejich kohezního porušení, které bylo vizuálně posouzeno po provedené smykové zkoušce.

Tab. 11: Průměrné hodnoty smykových pevností a kohezního porušení

Expoziční prostředí	Značení	Povrchová úprava dřeva	Smyková pevnost [MPa]		Kohezní porušení [%]
			Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
A5	Ref	-	11,8	2,4	80
	PTCF 1%	Plasmatická úprava	7,3	2,5	15
	PTCF 3%		12,5	2,4	60
	PTCF 5%		13,3	1,4	75

V následujícím Graf 4 jsou zobrazeny průměrné hodnoty smykových pevností a odpovídající průměry hodnot kohezního porušení.



Graf 4: Závislost smykové pevnosti na expozičním prostředí s uvedenými hodnotami kohezního porušení

Na základě provedených rešerší byly zjištěny rozdílné výsledky účinnosti plasmatické předúpravy povrchu dřeva. Na základě těchto diferencí bylo provedeno ověření těchto

výsledků. Experimentálně bylo ověřeno, že plazmatická předúprava má v případě bukového adherendu negativní vliv. Je možné se domnívat, že plazmatická úprava nebyla účinná z důvodu, že použité lepidlo nebylo na vodní bázi. Naměřené hodnoty vykazují pokles pevnosti ve smyku lepeného spoje s plazmatickou předúpravou povrchu dřeva. Velmi výrazný pokles pevností je nejvíce patrný u vzorků s 1 % plniva. Zbylé hodnoty pevností vzorků s plnivy jsou již srovnatelné s referenčními. Taktéž byl zaznamenán pokles kohezního porušení. Největší rozdíl kohezního porušení nastal rovněž u lepidla s 1 % plniva (pokles o 65 % vůči referenci). Naopak stejných hodnot kohezního porušení smykové plochy jako u referenčních vzorků bylo dosaženo u lepidel se 3% a 5% plnění.

7 Závěr

V bakalářské práci jsem se zabývala modifikací lepidel určených pro lepené spoje. Modifikace těchto lepidel spočívala v plnění vybranými typy plniv. V rámci práce byl sledován i vliv předúpravy bukového dřeva před procesem lepení.

V teoretické části jsem se zabývala obsáhlým tématem modifikace dřeva, kde jsem popisovala řadu metod, kterými se provádí různé úpravy, resp. modifikace dřeva. Z hlediska dlouhodobé udržitelnosti a ekologie se tepelná modifikace jeví jako nejvhodnější způsob úpravy. Při svém procesu nevyužívá ani neprodukuje nebezpečné látky, které by po životnosti výrobku nebo během ní, mohly způsobovat nežádoucí dopady na životní prostředí či na zdraví člověka. Je ale nutné podotknout, že u ostatních modifikací (chemické modifikace, impregnace) je velká snaha tyto škodlivé látky nevyužívat, nebo jen v omezeném množství. Pro tyto modifikace bude v budoucnu nutné ověřit jejich vliv na vlastnosti lepeného spoje. Je tedy možné, že budou zapotřebí trvanlivější lepidla (například s plnivý), která budou zajišťovat spojení modifikovaného dřeva. A ověření chování lepených spojů PUR lepidlem příp. plněným lepidlem vlákný v různých expozičních prostředích bylo součástí mojí experimentální práce.

V praktické části jsem provedla rozsáhlou rešerši vědeckých poznatků týkající se možných modifikací lepidla a rešerši vlivu povrchové úpravy dřeva plazmatem na kvalitu lepených spojů. Byla provedena analýza 6 druhů plniv z různých hledisek (tvarový index, dostupnost, cena, udržitelný charakter plniva, technologická náročnost úpravy plniva) a byl proveden optimalizační proces, na základě kterého bylo vybráno plnivo vykazující vlastnosti, které by byly významné pro jeho využití jako plnivo v lepidlech. Na základě rozhodovací matice (Saatyho matice) bylo vybráno uhlíkové vlákno.

Ze zjištěných výsledků lze konstatovat, že nebyl prokázán pozitivní vliv plazmatické předúpravy bukového dřeva na zvýšení odolnosti lepeného spoje. Výsledkem další experimentální části bylo ověření vlivu plnění 1C-PUR lepidla uhlíkovými vlákny. Bylo zjištěno, že plnění těmito vlákny (1, 3 a 5 hm %) nevykazuje zvýšenou smykovou pevnost u lepených spojů, které by reflektovaly zvýšenou trvanlivost lepeného spoje jednosložkovým polyuretanovým lepidlem. Trvanlivost lepeného spoje byla ověřována po hydrotermálním namáhání lepeného spoje (teplota vody 100 °C po dobu 6 hodin). Po tomto expozičním prostředí byl prokázán pozitivní efekt plnění lepidla uhlíkovými vlákny dosažením vyšších hodnot kohezního porušení definující vyšší míru

adheze lepeného spoje. Vyšší hodnoty u vzorků lepidel s plněním svědčí o tom, že vlákna vykazují pozitivní efekt zvýšení odolnosti lepené spáry při objemových změnách dřeva.

Použitá literatura

- [1] DEJMAL, Aleš. *Sušení a modifikace dřeva* [online]. Brno, 2017 [cit. 2023-04-30]
- [2] KUKLÍK, Petr a kolektiv. *Dřevěné konstrukce: Handbook 1*. 2008.
- [3] NOVÁK, Igor, Anton POPELKA, Zdeno ŠPITALSKÝ, et al. Investigation of beech wood modified by radio-frequency discharge plasma. *Vacuum*. 2015, 119, 88-94. ISSN 0042-207X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.04.038>
- [4] HILL, Callum. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. Vol. 5. West Sussex, England: John Wiley, 2006.
- [5] Homan, W. J., & Jorissen, A. J. M. (2004). Wood modification developments. *Heron*, 49(4), 361-385.
- [6] Sandberg D, Kutnar A, Mantanis G (2017). Wood modification technologies - a review. *iForest* 10: 895-908.
- [7] PENG, Yuxin, Qi FAN, Rongxian OU, et al. Modification of poplar wood cells using 1,3-dihydroxymethyl-4,5-dihydroxyethylideneurea/alkaline lignin for enhanced mechanical properties and decay resistance. *Construction and Building Materials*. 2023, **368**, 130354. ISSN 0950-0618. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130354>
- [8] ROWELL, R. M. *Handbook of engineering biopolymers, homopolymers, blends, and composites*. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 2007. ISBN 978-3-446-40591-2.
- [9] HUNT, Christopher G., Samuel L. ZELINKA, Charles R. FRIHART, Linda LORENZ, Daniel YELLE, Sophie-Charlotte GLEBER, Stefan VOGT a Joseph E. JAKES. Acetylation increases relative humidity threshold for ion transport in wood cell walls – A means to understanding decay resistance. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2018, **133**, 230-237. ISSN 0964-8305. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.06.014>
- [10] *ThermoWood® Handbook* [online]. Finnish Thermowood Association. FINDLAND, Helsinki, 2003 [cit. 2023-04-30]. www.thermowood.fi
- [11] ROWSON, A., A. H. UMMI, A. ZAIDON, H. H. NORUL a H. S. LEE. *Hydrothermal Modification of Wood: A Review* [online]. 2021 [cit. 2023-04-30]. doi:<https://doi.org/10.3390/polym13162612>
- [12] PETRIČ, Marko. *Surface Modification of Wood* [online]. University of Ljubljana: Scrivener Publishing, 2013 [cit. 2023-04-30]. DOI: 10.7569/RAA.2013.097308
- [13] AYDIN, İsmail. Activation of wood surfaces for glue bonds by mechanical pre-treatment and its effects on some properties of veneer surfaces and plywood

- panels. *Applied Surface Science*. 2004, **233**(1), 268-274. ISSN 0169-4332. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.03.230>
- [14] KÚDELA, Josef, Lubomír JAVOREK a Leoš MRENICA. *The effect of milling and sanding on the surface properties of beech wood. Part I. Surface morphology* [online]. In: *Annals of Warsaw University of Life Sciences*. 2016 [cit. 2023-04-30].
- [15] NIEMZ, Peter, Frédéric PICHELIN a Steffen HARLING. *Structural bonding of European beech wood with polyurethane adhesives* [online]. Vienna [cit. 2023-04-30]. University of Natural Resources and Life Sciences.
- [16] Kläusler, O., Hass, P., Amen, C. et al. Improvement of tensile shear strength and wood failure percentage of 1C PUR bonded wooden joints at wet stage by means of DMF priming. *Eur. J. Wood Prod.* 72, 343–354 (2014).
- [17] LANDROCK, H. *Adhesives technology handbook* [online]. London: Elsevier, 2009 [cit. 2023-05-01]. ISBN 978-0-323-35595-7.
- [18] *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. In: FRIHART, Charles R. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites: Wood Adhesion and Adhesives* [online]. CRC Press, 2005 [cit. 2023-05-16]. ISBN 0-8493-1588-3/05/\$0.00+\$1.50.
- [19] *Wood Adhesives and Bonding Theory*. In: ÜLKER, Onur. *Adhesives - Applications and Properties* [online]. 2016 [cit. 2023-05-01]. DOI:10.5772/65759
- [20] STOECKEL, Frank, Johannes KONNERTH a Wolfgang GINDL-ALTMUTTER. Mechanical properties of adhesives for bonding wood—A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2013, **45**, 32-41. ISSN 0143-7496. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.03.013>
- [21] RAMACHANDRAREDDY, Babureddy, Hendrikus W.G. VAN HERWIJNEN, Greeley BECK, Ronny BREDESEN a Johannes KONNERTH. Mechanical properties of wood adhesive bond lines tested in service classes according to Eurocode 5. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2022, **118**, 103233. ISSN 0143-7496. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103233>
- [22] KOŽELOUH, Bohumil. *Dřevěné konstrukce podle eurokódu 5: Navrhování a konstrukční materiály*. Zlín: KODR, 1998. ISBN 80-238-2620-4.
- [23] PIZZI, A. a C.C. IBEH. Chapter 2 - Phenol-formaldehyde resins. In: *Plastics Design Library*. Boston: William Andrew Publishing, 2022, s. 13-40. ISBN 978-0-12-821632-3. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821632-3.00013-0>
- [24] Pizzi, A.; Papadopoulos, A.N.; Policardi, F. Wood Composites and Their Polymer Binders. *Polymers* **2020**, *12*, 1115. <https://doi.org/10.3390/polym12051115>

- [25] GRØSTAD, K. a A. PEDERSEN. Emulsion Polymer Isocyanates as Wood Adhesive: A Review: A Review. *Journal of Adhesion Science and Technology*. Taylor & Francis, 2010/01/01, **24**(8-10), 1357-1381. ISSN 0169-4243. doi:10.1163/016942410X500981
- [26] Bockel, S., Harling, S., Konnerth, J. et al. Modifying elastic modulus of two-component polyurethane adhesive for structural hardwood bonding. *J Wood Sci* **66**, 69 (2020). <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01917-9>
- [27] Sanghvi, M.R., Tambare, O.H. & More, A.P. Performance of various fillers in adhesives applications: a review. *Polym. Bull.* **79**, 10491–10553 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00289-021-04022-z>
- [28] CAO, Long, Xiaojian ZHOU a Guanben DU. *Wood Adhesive Fillers Used during the Manufacture of Wood Panel Products*. In: . Rijeka: IntechOpen, 2020, Ch. 2. ISBN 978-1-83962-436-0. doi:10.5772/intechopen.91280
- [29] Dukarska, D., Czarnecki, R. Fumed silica as a filler for MUPF resin in the process of manufacturing water-resistant plywood. *Eur. J. Wood Prod.* **74**, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0955-4>
- [30] Bockel, S., Harling, S., Konnerth, J. et al. Modifying elastic modulus of two-component polyurethane adhesive for structural hardwood bonding. *J Wood Sci* **66**, 69 (2020). <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01917-9>
- [31] THOSTENSON, Erik T, Zhifeng REN a Tsu-Wei CHOU. Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review: a review. *Composites Science and Technology*. 2001, **61**(13), 1899-1912. ISSN 0266-3538. doi:[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00094-X)
- [32] WOLF, A., A. BUCHMAN, A. EITAN, T. FINE, Y. NEVO, A. HEYMAN a O. SHOSEYOV. Improved Adhesives Containing CNT/SP1 Nano Fillers. *The Journal of Adhesion*. Taylor & Francis, 2012/04/01, **88**(4-6), 435-451. ISSN 0021-8464. doi:10.1080/00218464.2012.660398
- [33] NEWMAN, Ben, Claudia CREIGHTON, Luke C. HENDERSON a Filip STOJCEVSKI. A review of milled carbon fibres in composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022, **163**, 107249. ISSN 1359-835X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107249>
- [34] BERAN, Rudolf, Lucie ZARYBNICKA a Dita MACHOVA. Recycling of rigid polyurethane foam: Micro-milled powder used as active filler in polyurethane adhesives: Micro-milled powder used as active filler in polyurethane adhesives. *Journal of Applied Polymer Science*. John Wiley, 2020/10/05, **137**(37), 49095. ISSN 0021-8995. doi:<https://doi.org/10.1002/app.49095>

- [35] Hýsek, Š., Šedivka, P., Böhm, M., Schönfelder, O., and Beran, R. (2018). "Influence of using recycled polyurethane particles as a filler on properties of polyurethane adhesives for gluing of wood," *BioRes.* 13(2), 2592-2601.
- [36] SIRÓ, István a David PLACKETT. Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review: a review. *Cellulose.* 2010, 17(3), 459-494. ISSN 1572-882X. doi:10.1007/s10570-010-9405-y
- [37] ÖZGÜR SEYDİBEYOĞLU, M. a Kristiina OKSMAN. Novel nanocomposites based on polyurethane and micro fibrillated cellulose. *Composites Science and Technology.* 2008, 68(3), 908-914. ISSN 0266-3538. doi:https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.08.008
- [38] HEON KWON, Jin, Seung-Hwan LEE, Nadir AYRILMIS a Tae HYUNG HAN. Tensile shear strength of wood bonded with urea-formaldehyde with different amounts of microfibrillated cellulose. *International Journal of Adhesion and Adhesives.* 2015, 60, 88-91. ISSN 0143-7496. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.04.002
- [39] MOYA, Róger, Ana RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, José VEGA-BAUDRIT a Vera ÁLVAREZ. Effects of adding nano-clay (montmorillonite) on performance of polyvinyl acetate (PVAc) and urea-formaldehyde (UF) adhesives in *Carapa guianensis*, a tropical species. *International Journal of Adhesion and Adhesives.* 2015, 59, 62-70. ISSN 0143-7496. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.02.004
- [40] Žigon, J., Kovač, J., Zaplotnik, R. et al. Enhancement of strength of adhesive bond between wood and metal using atmospheric plasma treatment. *Cellulose* 27, 6411–6424 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03212-8>
- [41] DAHLE, Sebastian, K. SRINIVASA, J. ŽIGON, A. M. Y. CHEUMANI, G. AVRAMIDIS, W. VIOL a M. PETRIČ. *Influence of Air Plasma Pretreatments on Mechanical Properties in Metal-Reinforced Laminated Wood* [online]. 17. January 2022 [cit. 2023-05-17]. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.796474>
- [42] ČSN EN 302-1 (668531). *Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Zkušební metody – Část 1: Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2013