

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

VÝVOJ DESKOVÝCH MATERIÁLŮ NA BÁZI DŘEVA S VYUŽITÍM PROCESU TERMICKÉ MODIFIKACE

DEVELOPMENT OF WOOD-BASED BOARD MATERIALS APPLYING THERMAL
MODIFICATION PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vlastimil Buriánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav technologie stavebních hmot a dílců
Student: **Bc. Vlastimil Buriánek**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24
Studijní program: N0732A260027 Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie

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

Vývoj deskových materiálů na bázi dřeva s využitím procesu termické modifikace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Z hlediska udržitelnosti se zvyšuje požadavek na výrobu materiálů, které by při zachování užitných parametrů snižovaly energetickou náročnost výroby či využívaly co nejširšího portfolia recyklovaných materiálů. K tomuto trendu je přistoupeno i v oblasti vývoje deskových materiálů na bázi dřeva, kde v současnosti dochází ke trendu nahrazení či snížení lepidel obsahující formaldehyd. Další možností se jeví i využití odpadních dřevních částic, u kterých bude zajištěna jejich stabilizace pro omezení nežádoucích objemových změn vhodně zvoleným typem modifikace. Doporučený rozsah diplomové práce bude 60 až 80 stran.

Cíle a výstupy diplomové práce:

V rámci práce bude provedeno:

1. na základě rešeršní činnosti vybrat a posoudit termickou odolnost lepidel určených pro lepení nosných dřevěných konstrukcí (lepidla typu I podle EN 301);
2. zrychlenými trvanlivostními zkouškami ověřit účinnost vybraných druhů lepidel pro lepení densifikovaných plošných materiálů;
3. zjistit účinnost densifikace deskových materiálů pomocí pevnostně tuhostních parametrů a tyto porovnat s referenčními nemodifikovanými materiály.

Seznam doporučené literatury a podklady:

DAGBRO, Ola. Studies on Industrial-Scale Thermal Modification of Wood. Skellefteå, Sweden, 2016. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology, Department of Engineering Sciences and Mathematics

BEKHTA, Pavlo, Stanisław PROSZYK, Tomasz KRYSZTOFIK, Jan SEDLIACIK, Igor NOVAK a Miroslava MAMONOVA. Effects of short-term thermomechanical densification on the structure and properties of wood veneers. Wood Material Science & Engineering. 2015, 12(1), 40-54. ISSN 1748-0272.

BEKHTA, Pavlo; SALCA, Emilia-Adela; LUNGULEASA, Aurel. Some properties of plywood panels manufactured from combinations of thermally densified and non-densified veneers of different thicknesses in one structure, Journal of Building Engineering, Volume 29, 2020, 101116, ISSN 2352-7102

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 21. 3. 2023

L. S.

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
vedoucí ústavu

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá účinností polyuretanových a fenol-resorcín-formaldehydových lepidel při aplikaci v lepených spojích tepelně upravených plošných materiálů. V rámci rešeršní činnosti byla provedena analýza termické odolnosti komerčně používaných lepidel. Dále byly popsány změny vlastností dřevěných materiálů po tepelné úpravě. V praktické části bylo provedeno ověření účinnosti použitých lepidel na densifikovaných březových překližkách s ohledem na smykovou pevnost výsledného kompozitu. Na základě dosažených výsledků bylo přistoupeno k ověření účinnosti densifikace na smrkových překližkách.

KLÍČOVÁ SLOVA

překližovaná deska, densifikace, tepelná odolnost lepidel, polyuretanová pryskyřice, fenol-resorcín-formaldehydové lepidlo, smyková plocha, pevnost ve smyku, kohezní porušení, modul pružnosti

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the effectiveness of polyurethane and phenol-resorcinol-formaldehyde adhesives when applied in bonded joints of thermally treated sheet materials. The thermal resistance of commercially used adhesives was analysed as part of a research activity. Furthermore, the changes in the properties of wood materials after heat treatment were described. In the practical part, the effectiveness of the used adhesives on densified birch plywood was verified with respect to the shear strength of the resulting composite. Based on the results obtained, it was proceeded to verify the effectiveness of densification on spruce plywood.

KEYWORDS

plywood, densification, thermal resistance of adhesives, polyurethane resin, phenol-resorcinol-formaldehyde adhesive, shear surface, shear strength, cohesion failure, modulus of elasticity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Vlastimil Buriánek *Vývoj deskových materiálů na bázi dřeva s využitím procesu termické modifikace*. Brno, 2024. 82 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vývoj deskových materiálů na bázi dřeva s využitím procesu termické modifikace* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 12. 1. 2024

Bc. Vlastimil Buriánek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vývoj deskových materiálů na bázi dřeva s využitím procesu termické modifikace* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2024

Bc. Vlastimil Buriánek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, trpělivost a vstřícnost, které se mi v průběhu zpracování práce dostávalo. Dále děkuji panu Ing. Adamu Běťákovi za věnovaný čas a výpomoc v laboratořích. Poděkovat chci i všem pracovníkům výzkumného centra Josefa Ressela v Brně-Útěchově, spadajícího pod Ústav nauky o dřevě a dřevařských technologiích LDF MENDELU, kteří se podíleli na zhotovení a úpravě zkušebních těles. Mé díky patří také rodině a přátelům, jež mě při studiu podporovali.

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Cíl práce	12
TEORETICKÁ ČÁST	13
3. Proces tepelné úpravy	13
3.1. Komerčně využívané metody	13
3.1.1. ThermoWood	13
3.1.2. Retifikace.....	14
3.1.3. Les Bois Perdure.....	14
3.1.4. Termovuoto.....	15
3.1.5. Nasycená pára (metoda WTT).....	15
3.1.6. Platón	16
3.1.7. Horký olej.....	16
3.2. Densifikace	16
4. Změna vlastností dřevěných materiálů po tepelné úpravě	17
4.1. Barevná změna výsledného kompozitu	17
4.2. Rozměrová stabilita materiálu	18
4.3. Změna mechanických vlastností.....	19
4.4. Kvalita povrchu a struktura výsledného kompozitu	20
4.4.1. Nanoindentace	21
4.5. Účinky krátkodobé tepelné modifikace na výsledné vlastnosti	22
5. Rešeršní analýza experimentálních studií k termické odolnosti lepidel	23
5.1. Vliv množství lepidla	23
5.2. Vliv zvýšených teplot	24
5.2.1. Melanin-močovino-formaldehydová (MUF) lepidla.....	24

5.2.2.	Fenol-resorcín-formaldehydová (PRF) lepidla.....	25
5.2.3.	Polyuretanová (PUR) lepidla.....	26
5.3.	Účinky dlouhodobě a krátkodobě zvýšených teplot.....	28
5.4.	Nové přístupy v návrzích dřevěných lepených spojů.....	28
5.4.1.	Lepidla na bázi taninu.....	29
5.4.2.	Lepidla na bázi ligninu	29
5.4.3.	Lepidla na bázi sacharidů	30
5.4.4.	Další lepidla na biologické bázi.....	30
PRAKTICKÁ ČÁST.....		31
6.	Metodika práce.....	31
6.1.	ETAPA 1 – Ověrování účinnosti lepidel pro lepení termicky ošetřeného překližovaného dřeva.....	33
6.1.1.	Specifikace metody densifikace	33
6.1.2.	Dřevěný adherend.....	34
6.1.3.	Lepidla pro aplikaci do kompozitního systému překližovaná deska/překližovaná deska.....	35
6.1.4.	Příprava zkušebních vzorků.....	36
6.1.5.	Specifikace použitých metod.....	38
6.2.	ETAPA 2 – Ověření účinnosti densifikace proti efektu set-recovery	41
6.2.1.	THM a TM densifikace, materiál	41
6.2.2.	Specifikace prováděné zkoušky.....	42
6.3.	ETAPA 3 – Ověření adaptability procesu densifikace.....	43
6.3.1.	Specifikace použitého materiálu.....	43
6.3.2.	Stanovení pevnostně tuhostních parametrů	44
7.	Výsledky experimentu	46
7.1.	Účinnost vybraných lepidel.....	46
7.1.1.	Parametry densifikace.....	46

7.1.2.	Pevnost ve smyku	47
7.1.3.	Způsob porušení lepeného spoje.....	49
7.2.	Účinnost densifikace proti efektu set-recovery	50
7.3.	Adaptabilita procesu densifikace.....	52
7.3.1.	Pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu.....	52
8.	Vyhodnocení a diskuse výsledků	53
8.1.	ETAPA 1 – Účinnost lepidel PRF a PUR pro lepení termicky ošetřeného překližovaného dřeva.....	53
8.1.1.	Stanovení pevnosti ve smyku	53
8.1.2.	Způsob porušení lepeného spoje.....	61
8.2.	ETAPA 2 – Účinnost densifikace proti set-recovery efektu při dlouhodobém cyklování.....	62
8.2.1.	Set-recovery.....	62
8.3.	ETAPA 3 – Ověření adaptability procesu densifikace	65
8.3.1.	Pevnost v ohybu	65
8.3.2.	Modul pružnosti v ohybu.....	65
9.	Závěr	67
	Seznam použité literatury.....	69
	Seznam použitých obrázků	79
	Seznam použitých tabulek.....	80
	Seznam použitých grafů.....	81

1. Úvod

Otázka udržitelnosti v oblasti stavebnictví je jedním z nejvíce probíraných témat poslední doby. Ve vývoji materiálů je tak potřeba hledat možnosti, kterými se zmírní negativní vlivy na životní prostředí, sníží energetická náročnost průmyslových procesů a dojde k vyššímu podílu využívání recyklovatelných surovin.

Vývoj deskových materiálů na bázi dřeva není v tomto ohledu výjimkou, zejména snahou omezit nebo minimalizovat obsah formaldehydu v použitých lepidlech, jenž má škodlivé účinky na člověka.

Jelikož jsou lepené dřevěné kompozity široce používány ve stavebnictví, nese to s sebou zvýšené riziko požáru kvůli přirozené hořlavosti těchto materiálů a použitých lepidel. V porovnání s dřevostavbami na bázi kulatiny je požární odolnost lepeného dřeva odlišná právě díky přítomnosti lepidel [1]. Pevnost spoje je ovlivněna tepelnými vlastnostmi použitých lepidel. V případě nedostatečné termické odolnosti může dojít až k selhání adheze mezi lamelami a při působení ohně ke změně chování průřezu prvku [2]. Některá lepidla mohou být ale tažná a vykazovat tak charakter tečení při vysokých teplotách. Široce používanými lepidly z hlediska jejich nízké ceny jsou močovino-formaldehydová lepidla. Takové lepidlo však není vhodné do použití v exteriéru a trpí nízkou životností [1].

Modifikace tepelnými úpravami pro dřevěné kompozitní materiály bývají také často negativně hodnoceny pro jejich skutečnost, že výrobkem je zpravidla deskový materiál, který má svoji specifickou barvu a zápach. To však nemění fakt na tom, že díky různým tepelným modifikacím dochází, dle významného počtu vědeckých studií, ke zlepšení výsledných vlastností daného kompozitu.

2. Cíl práce

Hlavní náplň teoretické části diplomové práce bude posoudit zvolené typy termické úpravy na vlastnosti lepených dřevěných prvků používaných pro konstrukční účely. V této oblasti je nejdůležitější termická odolnost aplikovaného typu lepidla, které se bude věnovat kapitola rešerší vědeckých studií, navazující na průzkum možných tepelných úprav deskových materiálů a změnu výsledných vlastností tepelně upraveného dřevěného materiálu.

V experimentální části bude ověřována účinnost zvolených typů lepidel aplikovaných na densifikované plošné materiály. Zvolená lepidla se budou lišit z hlediska složení. Kvalita a trvanlivost lepených spojů bude zkoumána při mechanickém zatížení, tj. bude vyjádřena pevnostními parametry. Dále bude zkoumán i typ porušení (kohezní/adhezní) v dřevěném v lepeném systému. V rámci experimentu bude dále zjišťována účinnost prováděné densifikace vyjádřená pevnostními a tuhostními parametry.

Výsledkem experimentu bude vyhodnocení účinnosti vybraných typů lepidel v systému lepených densifikovaných překlížovaných desek vůči mechanickému namáhání a po expozicích různým expozičním prostředí. Poznatky z této práce tak mohou napomoci rozšířit znalosti, jakými možnostmi dále přistupovat ve vývoji deskových materiálů.

TEORETICKÁ ČÁST

3. Proces tepelné úpravy

První zmínky o tepelné úpravě dřeva jsou staré již více než 100 let. Vlivem nadměrného zahřívání (zpravidla při teplotách 170 až 220 °C bez přístupu kyslíku) u dřeva dochází ke snížení jeho hygroskopičnosti. Dřevo díky tomuto procesu získává řadu výhod a příjemnou hnědou barvu [3; 4; 5].

Mezi největšími výhodami, kterých lze dosáhnout, řadí většina autorů, kteří se touto problematikou zabývali, rozměrovou stabilitu, snížení nasákavosti a s tím související nižší bobtnání, odolnost vůči škůdcům a mikroorganismům, nižší vnitřní pnutí a ulehčení mechanické práce díky nižší hmotnosti a hustotě [4; 6].

V 80. letech minulého století se tak začaly hojně vyvíjet průmyslové technologie určené pro tepelné úpravy dřeva. Některé z těchto metod jsou v krátkosti v následujících podkapitolách blíže specifikovány.

3.1. Komerčně využívané metody

3.1.1. ThermoWood

ThermoWood je nejrozšířenější průmyslový proces tepelné úpravy dřeva v Evropě. Na trh vstoupil již v roce 2001. Mezinárodní asociace ThermoWood® přesně definuje a certifikuje standartní podmínky tohoto procesu. Díky tomu se tento proces stal ochrannou známkou, který schválil Úřad Evropské unie pro duševní vlastnictví (dříve známý jako Úřad pro harmonizaci ve vnitřním trhu), registrovanou ve Švýcarsku, Japonsku, Číně, USA a Kanadě [3; 7].

Ohřev dřeva při tomto procesu se děje v atmosférické přehřáté páře a je rozdělen do tří základních fází:

- i) fáze 1:** při které se teplota neustále zvyšuje na 130 °C, dochází tak k vysoušení dřeva a poklesu obsahu vlhkosti,
- ii) fáze 2:** teplota v peci je zvýšena na 185 až 215 °C a na této úrovni je udržována po dobu 2 až 3 hodin,

iii) fáze 3: při této závěrečné fázi dochází k chlazení pomocí vodních sprejových systémů a následné opětovné zvlhčení pro dosažení obsahu vlhkosti ve dřevě na hodnotě 4 až 7 % [3].

V průběhu procesu je nutné znát změny teplot a rozložení vlhkosti s časem, jelikož jsou tyto informace následně použity k úpravám parametrů ošetření a k samotné kontrole kvality konečného produktu. Díky tomu již existuje řada matematických modelů, které tyto stavy úspěšně předpovídají [8].

ThermoWood nabízí dvě klasifikace svých produktů dle odolnosti a budoucí aplikaci. První klasifikace, označována jako Thermo-S, má předepsanou teplotu v rámci 2. fáze, samotného procesu tepelné úpravy, pro měkké dřevo na hodnotě 190 °C a 185 °C pro tvrdé dřevo. Zatímco třídu Thermo-D popisují teploty 212 °C v případě měkkého dřeva a 200 °C pro tvrdé dřevo [3].

3.1.2. Retifikace

Jde o výrazně odlišný proces tepelné modifikace. Na rozdíl od ostatních je totiž jako topné médium využit dusík. Dřevěné materiály jsou při procesu retifikace pomalu zahřívány v dusíkové atmosféře s méně než 2 % kyslíku, na teploty 210 a 240 °C. Vyvíjet tuto metodu začala francouzská technická univerzita Saint-Étienne ve spolupráci s firmou Ray Burner. První linka byla instalována již v roce 1998. Dle dostupných informací je výsledné dřevo více odolné proti houbám a hmyzu s výjimkou termitů. Svě minus pociťuje i v rozměrové stálosti. Pro konstrukční prvky se použití nedoporučuje vzhledem ke sníženým mechanickým vlastnostem, ale své uplatnění nachází zejména v oblasti obkladů a palubek. Jedinou nevýhodou samotného procesu je fakt, že při procesu vznikají vedlejší produkty, kapalného i plynného charakteru, které je nutné dále upravovat, zejména neutralizovat jejich kyselost (vzniklé produkty mají zpravidla pH mezi hodnotami 2 a 3) [3; 9].

3.1.3. Les Bois Perdure

Komerční technologie využívající nasycenou vodní páru při teplotě přibližně 230 °C. Prvním krokem bývá často sušení dřeva, poté následuje samotná tepelná úprava. Proces neprodukuje atmosférické emise, jelikož využívá odpařenou vodu jako topné médium během fáze tepelné modifikace [3].

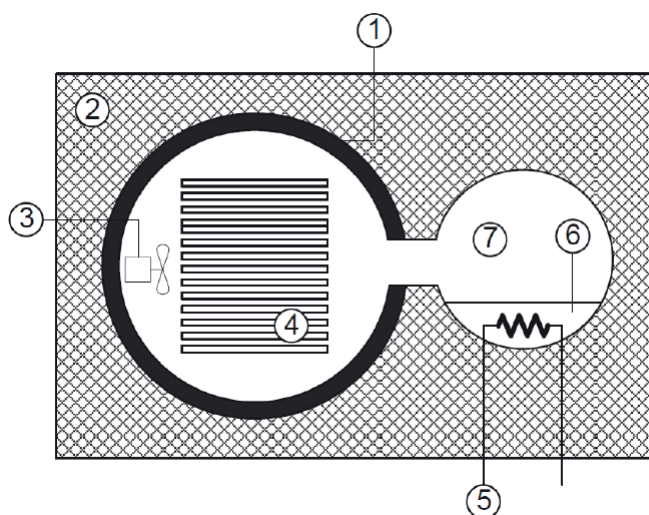
3.1.4. Termovuoto

Poměrně nová metoda tepelné úpravy dřeva, kdy je reaktor vyplněn částečně vakuem. Subatmosférický tlak je během procesu udržován na hodnotách mezi 150 a 350 mbar. Dřevo se nejprve suší při teplotách do 100 °C tak, aby dosáhlo 0% vlhkosti. V té stejné komoře se pak provádí i samotná úprava, díky zvýšením teploty na 160 až 220 °C [3; 10; 11].

3.1.5. Nasycená pára (metoda WTT)

Tepelná modifikace v nasycené páře pod tlakem při teplotách mezi 160 a 190 °C je jednou z dalších metod, díky které dochází k podobným jevům u dřevěných materiálu, jako při úpravě s vyššími teplotami v přehřáté páře. Tuto koncepci převzala společnost WTT a začala tento proces vyvíjet. Tepelná úprava probíhá v autoklávovém válci z nerezové oceli, kde se nepoužívají ventilátory. Pára se vyrábí pomocí vodou ohříváným radiátorem uvnitř válce a odpařováním přebytečné vody ze dřeva. Samotné zařízení je navrženo tak, aby vydrželo tlak 20 barů (2 MPa) a teplotu 210 °C. Vyvíjením této metody byly stanoveny optimální podmínky na teplotách mezi 160 a 180 °C a tlaky mezi 7 a 10 bary.

Na podobném principu je založena i technologie Firmolin®. Při té je v procesu tepelné modifikace přidána druhá komora pro přesnější regulaci teploty i tlaku par. Obr. 1 znázorňuje schéma této technologie. Komoru pro proces tepelné modifikaci tvoří autokláv (v něm se dřevo tepelně zpracovává nasycenou párou pod tlakem), ke které je připojena druhá komora, ohříváný zásobník vody s možností regulace teplot [3].



Obr. 1: Schéma technologie tepelné modifikace Firmolin (1 – topný plášť autoklávu, 2 – tepelná izolace, 3 – ventilátor, 4 – dřevěný materiál, 5 – topné těleso, 6 – zásobník vody, 7 – vodní pára) [3]

3.1.6. Platón

Dvojstupňovitý proces probíhající v reaktoru z nerezové oceli s mezistupněm sušení v konvenční peci. První zahřívání dřeva se děje pod tlakem (podmínky nasycené vodní páry) v teplotním rozmezí 160 až 190 °C. Po tomto stupni dochází znovu k mezistupni sušení v konvenční peci. Závěrem se dřevo znovu zahřívá přehřátou párou za atmosférických podmínek v teplotním intervalu 170 až 190 °C [3].

3.1.7. Horký olej

Metoda kombinuje účinek tepla a rostlinného oleje jakožto média proto, aby se teplo šířilo po dřevě rovnoměrněji a mohlo zabránit vnikání kyslíku během procesu úpravy. Do nádoby se dřevem je vháněn horký olej o teplotě 180 až 220 °C. Systém je takto udržován po dobu 2 až 4 hodin [3; 12; 13].

3.2. Densifikace

Tepelná úprava skládající se zpravidla ze tří kroků. Během prvního kroku dojde k plastifikaci dřevěné buňky. K plastifikaci může dojít vlivem zvýšené teploty nebo při současném působení vyšší teploty a rovnovážné vlhkosti po určitou dobu. Díky tomu se začnou měnit vlastnosti ligninu v buněčné struktuře dřeva. Následuje krok stlačení, kdy je plastifikovaný materiál umístěn do hydraulického lisu s topnými deskami, který vyvozuje na deskový materiál tlak se současně působící teplotou kolem 180 °C. Závěrečným krokem je tuhnutí vytvořeného kompozitu a přímo navazující stabilizace výsledného deformovaného stavu [14; 15].

Po zhuštění získá materiál celou řadu výhod, což lze využít při práci se dřevinami vykazující nízkou objemovou hmotnost. U densifikovaných materiálů zpravidla dochází ke zvýšení pevnosti, tvrdosti a rázové houževnatosti v ohybu. Ve srovnání s chemickými metodami má velké výhody v zachování ekologických vlastností přírodního dřeva a ochraně životního prostředí [14].

4. Změna vlastností dřevěných materiálů po tepelné úpravě

U materiálů na bázi dřeva, které projdou určitou tepelnou úpravou, zpravidla dojde ke změnám jeho vlastností. První takovou viditelnou změnou tepelně upraveného dřevěného materiálu je jeho charakteristická barevná změna a charakteristická vůně. Ty mnohdy nemusí na konečného spotřebitele působit kladně. Má-li však výsledný produkt z takto upraveného dřeva splňovat konkurenceschopnost na trhu s exkluzivnějším tvrdým dřevem, jsou tyto přeměny nevyhnutelné. Obě uvedené změny však nejsou ty jediné zásadní, které u vyvíjeného kompozitu nastanou. Změny se mohou dále promítnout v jeho rozměrové stabilitě, odolnosti proti biologickému účinku nebo například ve struktuře [16].

4.1. Barevná změna výsledného kompozitu

Tepelné zpracování dřeva mění jeho chemické složení degradací jak sloučenin buněčné stěny, tak extraktivních látek. Tepelná degradace začíná deacetylací hemicelulóz a uvolněním kyseliny octové působící jako depolymerizační katalyzátor, který dále zvyšuje rozklad polysacharidů [17; 18]. Degraduje také amorfni celulóza, což má za následek zvýšení její krystalinity [19]. V ligninu dochází ke snížení obsahu methoxyly a vzniku kondenzovanější struktury [17]. Tmavší tonalita materiálu je zdůvodněna tvorbou barevných degradačních produktů z hemicelulóz a z extraktivních látek. Reakce je podobná Maillardově reakci, dobře známému procesu v potravinářském průmyslu [16].

Na základě výsledků v experimentu [17], v rámci kterého bylo tepelnou úpravou podrobena borovicové a eukalyptové dřevo, se došlo k závěru, že u eukalyptového dřeva ošetřeného při 190 °C po dobu 6 hodin bylo zaznamenáno snížení světlosti o 43,8 % a 45,6 % při ošetření v autoklávu. Pokles světlosti borovicového dřeva byl vyšší, s maximálním poklesem o 51 % v radiálním směru. Nicméně eukalyptová dřeva snížila svoji světlost i při méně intenzivním tepelném zpracování párou, které probíhalo při stejné teplotě po dobu 2 hodin. Podobný jev byl pozorován i dříve u smrkového dřeva. **Barevná změna přímo souvisela s úbytkem hmoty.** Změna barvy, která se v experimentu prokázala, je výhodná zejména pro druhy s nevábnou barvou dřeva. Těmi jsou právě například borovice a eukalyptus používané v rámci této práce.

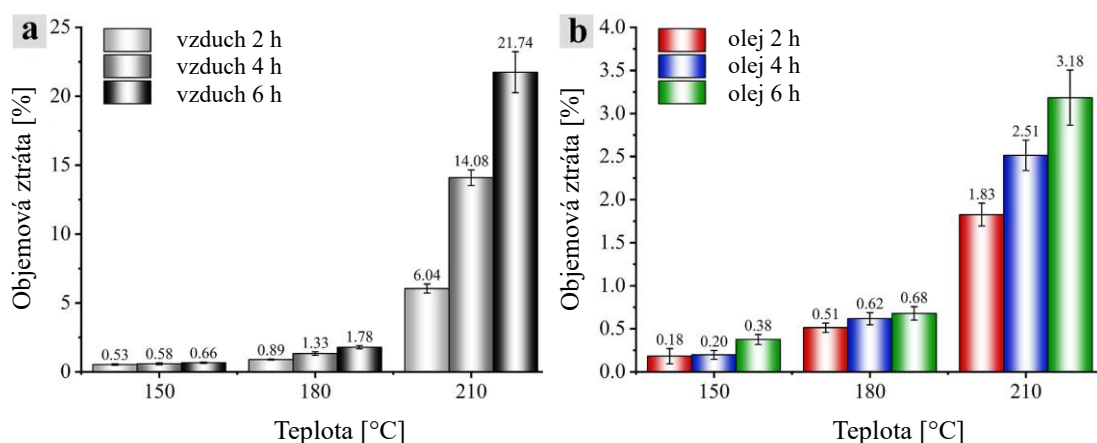
Další studie zabývající se změnou barvy využívala pro svůj experiment dřeva borovice a smrku. Vzorčky byly vystaveny dvěma tepelným modifikacím: ThermoWood s použitím

přehřáté páry a WTT (*z angl. Wood Treatment Technology*) zahrnující hygrotermální úpravu ve vysokotlakém autoklávu. Větší odchylka hodnot sytosti byla pozorována u dřeva ošetřeného metodou WTT. Dřevo tak bylo tmavší i za stavu, že bylo modifikováno při teplotě 160 °C (tedy o 30 °C méně než metodou přehřáté páry). I přesto má však hygrotermální úprava prostory pro zlepšení [16].

Zajímavý byl i výzkum pracující s dřevem břízy bělokoré, jejíž desky byly tepelně upraveny v přehřáté a syté páře. Maximální teplota při modifikaci přehřáté páry byla 185 °C a byla udržována 2 hodiny. Druhá úprava měla nastavenou teplotu 160 °C s dobou výdrže jedna hodina. Výsledky prokázaly, že barevný rozdíl mezi břízou ošetřenou v syté páře a v přehřáté páře je pouze malý. Vzorky z břízy modifikované v syté páře byly dokonce kyselejší – měly pH 2,9 [20].

4.2. Rozměrová stabilita materiálu

Tepelně upravené dřevo může ztrácet hmotnost a objem, značně se smršťovat, což tak může vést ke snížení skutečného využití [21]. Skupina vědců z Pekingské lesnické univerzity zkoumala účinnost přírodního tungového oleje na smršťování dřeva během procesu tepelné úpravy. Předmětem jejich práce se stal sibiřský jilm, ze kterého vytvořily sady vzorků s rozměry 20×20×20 mm. Tungový olej, obsahující nenasycené mastné kyseliny¹ byl nanášen v lázni na vzorky zpracované kombinací olejové impregnace a tepelného ošetření. Komparace výsledků probíhala se sadou vzorků ošetřených vzduchem v elektrické sušící peci [21].



Graf 1: Objemová změna vzorků dřeva tepelně upraveného vzduchem (a) a tepelně upraveným tungovým olejem (b) [21]

¹ kyselinu eleostearovou (77–82 %), kyselinu linolovou (8–10 %) a 3,5–12,7 % kyseliny olejové

Celkově se rozměrové smrštění a ztráta objemu tepelně zpracovaných vzorků dramaticky zvýšily s rostoucí teplotou a dosáhly svého vrcholu při 210 °C po dobu 6 hodin. Nejvíce bylo **sníženo smrštění u vzorků upravených tungovým olejem v tangenciálním směru** (sníženo o 84 %). Dramatickou změnu autoři zaznamenali i v maximální objemové ztrátě. Ta se snížila o 85 %, což je patrné na grafu viz Graf 1 [21].

Celkové bobtnání dřevěné buňky a bobtnání způsobené uvolněním tlakového napětí bylo v další studii [22] vyvoláno ponořením výsledných stlačených vzorků do vody. Vzorky byly z pětivrstvých překližovaných panelů zhuštěných i nezhuštěných dýh bukového dřeva, lepených močovinoformaldehydovou pryskyřicí. Ponořením do vody začne docházet k uvolnění tlakových napětí, které zhoršují odolnost dřevěných panelů vůči vodě [23]. Hodnoty tloušťek při bobtnání se významně zvýšily u vzorků překližky ze zhuštěných dýh. V případě menšího množství lepidla byl zjištěn opak. Z výsledků je tak zřejmé, že díky **většímu podílu množství lepidla** v kompozitu můžeme **zabránit absorpci vody do buněčné struktury** [22].

4.3. Změna mechanických vlastností

Kuai a kol. studovali stabilní strukturu topolu s odolností proti ohni a plísním delignifikací dřeva. Ustálené vzorky, při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 %, poté prošly třístupňovým procesem úpravy. Nejprve byly vzorky dřeva podrobeny chemické předúpravě pomocí kombinace NaOH a Na₂SO₃ při teplotě 95 °C po dobu 10 hodin, poté bylo dřevo čtyřikrát oplachováno. Ve druhém kroku došlo k vysušení s následnými cykly vakuové impregnace a finální impregnací fluorokřemičitanem sodným. Posledním krokem se vzorky zalisovaly za tepla při 180 °C po dobu 2 hodin [24].

Impregnace dřeva pro vyplnění pórů a zvýšení hustoty dřeva se prokázalo jako účinný způsob, jak zlepšit mechanické vlastnosti. U všech vzorků dřeva ošetřeného uvedeným způsobem bylo pozorováno výrazné zlepšení oproti přírodnímu dřevu po vysokoteplotním zhuštění. Modul pružnosti se zvýšil až šestkrát. Hlavním důvodem byl křemičitan sodný, který ztuhnutím v buněčné stěně vytvořil pevný rám, a vysokoteplotní zhuštění pak zpevnilo vnitřní spoje [24; 25; 26].

Výsledky zároveň prokázaly **zlepšenou tepelnou odolnost, dobrou rozměrovou stabilitu a vyšší odolnost proti plísním** po 12 dnech v důsledku odstranění hemicelulózy, ligninu a živin účinným procesem densifikace [24].

Jiný experiment [27] získal výsledek ve zvýšení pevnosti ve smyku po přidavku olšové dýhy do vnitřních vrstev březové překližky. Srovnatelný trend byl i v případě přidání březové dýhy do vnitřních vrstev překližky z olše vyrobené z nezhuštěných i zhuštěných dých. Komprese dých s velikostí tlaku 2 MPa a teplotě 180 °C trvala v lise 3 minuty. Lepení probíhalo močovinoformaldehydovou pryskyřicí¹ v množství 110 g/m². Vzniklá překližka pak byla stlačována při 130 °C, tlaku 1,8 MPa v celkovém čase 5,5 minuty.

4.4. Kvalita povrchu a struktura výsledného kompozitu

Autoři výzkumu [22] neočekávali, že by povrchová tvrdost vzorků překližky ze zhuštěné dýhy mohla být menší než u vzorků z nezhuštěné dýhy. Vysvětlení tkví v tom, že jeden typ dýhy byl zhuštěn dvakrát – nejprve při tepelném stlačování dýhy a později při lisování překližky. Povrch dýhy po stlačení je zpravidla hladký, dýha zvyšuje svoji hustotu, snižuje vlhkost a stává se křehkou. Jelikož ji další použití pro výrobu překližky opět podrobí zhuštění, začnou vznikat mikropřaskliny na povrchu a dojde ke snížení povrchové tvrdosti.

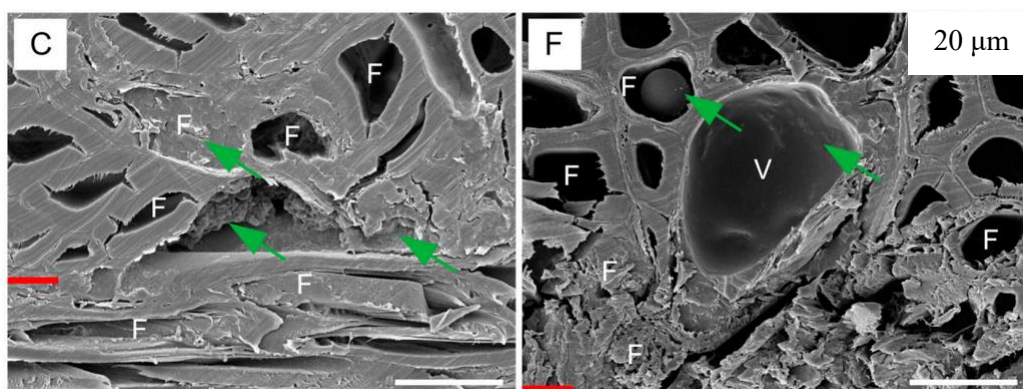
Struktura povrchu bývá v důsledku vysoké úrovně tlaku zničena. Proto je použití vysokého tlaku na překližovanou desku nevhodné. Nese to s sebou také nadměrnou spotřebu surovin [22].

Vztah mezi drsností povrchu a zvoleným typem panelu nebyl zaznamenán. Drsnost povrchu vzorků překližky, vyrobených ze zhuštěné dýhy, byla vyšší než u vzorků vyrobených z nezhuštěné dýhy. Dále bylo zjištěno, že dýha s vyšší hustotou byla hladší a silnější dýha byla hrubší, než dýha tenčí [22].

Strukturu tepelně upraveného dřevěného kompozitu mohou přiblížit mikroskopické snímky z SEM. Toho bylo využito mimo jiné v experimentu s březovým a olšovým dřevem [27]. Březové dřevo mělo menší procento cév ve srovnání s olší. Pronikání používaného lepidla ovlivnilo uspořádání anatomických prvků dých. U nezhuštěných březových dých lepidlo neproniklo do hlubších vrstev. Bránila tomu i vrstva slisovaných vláken a cév.

¹UF pryskyřice vznikla přípravou 5% dusičnanu amonného (tvrdidla) a 2% kaolinu (plniva).

Zhuštění povrchových vrstev březových dých způsobilo eliminaci lumenů a projevilo se i ve snížení drsnosti povrchu. Používané dřevo olše mělo vyšší počet cév než dřevo břízy a jeho dřevní vlákna byla tenkostěnná. V důsledku vyšší pórovitosti olšového dřeva tak došlo ke snadnějšímu pronikání močovinoformaldehydové pryskyřice do hlubších vrstev dýhy. Přesto však u zhuštěných olšových dých byla také registrována výrazná vrstva deformovaných vláken a cév. I zde se kvůli zhuštění povrchových vrstev, stejně jako u varianty s březovým dřevem, dosáhlo zamezení pronikání lepidla do hlubších vrstev. Obě varianty dřevěných panelů obsahovaly mikroskopické praskliny, jež vznikaly odlupováním dýhy a bylo je možné proto velmi zřetelně pozorovat [27].



Obr. 2: SEM snímek z pozorování spojovací linie v olšové překlížce nezhuštěné (C) a zhuštěné dýhy (V – céva, F – dřevní vlákno, červená čára značí spojovací čára, bílá šipka znázorňuje prasklinu, močovinoformaldehydová pryskyřice je označena zelenou šipkou. Měřítko snímku: 20μm) [27].

4.4.1. Nanoindentace

Morfologie vzorků dřeva lze kromě metody rastrovacího elektronového mikroskopu sledovat i v oblastech nanometrů. K takovému pozorování může sloužit například přístroj s označením GEMINI 500SEM. Příprava vzorků spočívá v rozřezání ostrím na malé kousky. Ty jsou následně stabilizovány například epoxidem SPURR, ale mohou být i bez stabilizace, a před samotnou úpravou mikrotomem jsou ponořeny v dusíku [28; 29]. Mikrotom zajistí drsnost povrchu vzorku pod 60 nm [30].

Na katedře materiálůvých věd a procesního inženýrství, Univerzity přírodních zdrojů a věd o živé přírodě ve Vídni, se skupina výzkumníků zabývala nanoindentací v souvislosti s adhezí dřevěných buněčných stěn. Pro předmět své práce vytvořily vzorky ze smrkového dřeva slepené jednosložkovým polyuretanovým a močovinoformaldehydovým lepidlem. Adheze lepidel ke stěně dřevěných buněk byla hodnocena na dvou různých místech. Prvním

z míst odpovídalo rozhraní mezi lepidlem a přirozeným povrchem vnitřní buněčné stěny vrstvy sekundární buněčné stěny (S3), zatímco druhé místo mělo rozhraní s čerstvě nařezanou vrstvou sekundární buněčné stěny (S2). Výsledky práce zjistily vynikající adhezi UF pryskyřice k čerstvě řezaným buněčným stěnám (S2) [31].

O naměření mechanických vlastností dřevěných vláken pomocí techniky kontinuální nanoindentační metody se pokusili vědci v USA. Dospěli k názoru, že měření tvrdosti a tuhosti v různých hloubkách naznačuje, že existuje malý vliv velikosti vtisku. Navíc má pryskyřice zanedbatelný vliv na data testu nanoindentace buněčné stěny [29].

4.5. Účinky krátkodobé tepelné modifikace na výsledné vlastnosti

V rámci studie [32] byly použity rotačně loupané dřevěné dýhy olše, buku, břízy a borovice s vlhkostí cca 5 %. Nízký obsah vlhkosti byl volen záměrně, aby se co nejvíce zabránilo strukturálnímu poškození. Všechny dýhové desky byly zhuštěny mezi vyhřívanými deskami laboratorního lisu s otevřeným systémem, a to při teplotách 100 °C, 150 °C nebo 200 °C a tlacích 4, 8 nebo 12 MPa. Doba expozice byla shodná ve všech případech a trvala 4 minuty. Před samotným ověřováním vlastností byly densifikované vzorky uloženy do klimatizační komory, kde byla udržována teplota 20 °C a relativní vlhkost 65 %, do doby, než dosáhly konstantní hmotnosti.

Výsledky prokázaly malé chemické změny ve zhuštěných dýhách. Konečné hustoty materiálů závisí na použitém tlaku, teplotě i druhu dřeva. Zejména byl zaznamenán nárůst hustoty od teploty 150 °C do 200 °C, což koreluje s měknutím dřeva, snížením prázdného objemu lumenů v materiálu a zvýšením počtu buněčných stěn na jednotku objemu [32].

Nejvyšší kompresní poměr měla ze sledovaných dřevin olše, naopak nejnižší buk. Dále bylo dle očekávání dosaženo hydrofobního charakteru u zhuštěných dých z olše, buku, břízy a borovice. Z hlediska smáčivosti byl sledován vliv teploty na úhel smáčení. Ten je oproti tlaku významnější. Stejný ukazatel se projevil i při zkouškách drsnosti povrchu [32].

Z naměřených výsledků byl vyvozen závěr, že **krátkodobé zhušťování dých poskytuje stabilní vlastnosti po dobu až 24 hodin po zhuštění**, což je důležitým faktorem zejména v oblastech průmyslových aplikací [32].

5. Rešeršní analýza experimentálních studií k termické odolnosti lepidel

Nahrazováním masivního dřeva dřevěnými kompozity, jako jsou například překližka nebo lepené vrstvené dřevo, roste zájem i o jejich modifikace za účelem vylepšit fyzikální, mechanické a estetické vlastnosti. Právě tepelná modifikace je jednou z ekologických metod, která ke zlepšení vlastností napomáhá. Současně je však potřeba brát v úvahu termickou odolnost samotných lepidel, které jsou při výrobě lepených kompozitů nedílnou součástí [1].

5.1. Vliv množství lepidla

Zkouškám ve studii [22] byly podrobeny pětivrstvé překližkové panely, které byly vyrobeny kombinací z nezhuštěných a tepelně zhuštěných bukových dýh v tloušťkách 1,25 a 2,5 mm a jejich kombinací. Vlhkost slepovaných tenkých a tlustých dýh se pohybovala kolem 6, resp. 10 %. Plnivem v močovinoformaldehydové pryskyřici, kterou byly dýhy slepovány, byla pšeničná mouka. Množství používaného lepidla bylo 180 nebo 110 g/m². Výsledný kompozit byl densifikován tlakem 2,7 MPa při teplotě 130 °C po dobu 5,5 minut. Poté byly překližky ochlazeny na teplotu (20±2) °C a relativní vlhkost (65±5) %. Naformátováním z desek vznikly sady vzorků pro stanovení pevnosti v ohybu, smyku a rozměrových změn.



Obr. 3: Porušení dřeva ve vzorcích po zkoušce pevnosti ve smyku: (a) panely s vyšším obsahem lepidla; (b) panely s nižším obsahem lepidla [22]

Na základě výsledků z experimentu se zjistilo, že množství lepidla ovlivnilo celkovou hustotu překližky. U jednoho z případů bylo použito nižší množství lepidla, protože předchozí studie [33; 34] již zjistily, že **zhuštěné dřevo poskytuje nižší spotřebu lepidla při výrobě překližky** ve srovnání s nezhuštěnou dýhou. Hodnota pevnosti v ohybu (MOR) pro překližkový panel z nezhuštěné dýhy s použitím nižšího množství lepidla byla menší než v případě stejné dýhy, ale při vyšším množství lepidla. Hodnoty se však výrazně nelišily. Varianta zhuštěné dýhy s nižším množstvím lepidla nabyla hodnot o 18,2 % méně než pro panely s množstvím lepidla 180 g/m². Varianta kombinací zhuštěné a nezhuštěné dýhy taktéž nezaznamenala významné rozdíly [22].

Nižší množství pryskyřice zajistilo u bukových překližovaných vzorků v podstatě vyšší hodnoty pevnosti ve smyku. Nicméně, když bylo použito **větší množství lepidla, vykazovaly vzorky vynikající kvalitu spojení**, což se projevilo ve vysokém procentu 100% porušení dřeva (viz Obr. 3 (a)). Opakem byl případ panelu s nižším obsahem pryskyřice, který měl 100% porušení v linii lepidla (viz Obr. 3 (b)) [22].

5.2. Vliv zvýšených teplot

Je-li konstrukce z lepeného lamelového dřeva vystavena namáhání ohybem, může lepicí linie v blízkosti neutrální osy odolat maximálnímu smykovému namáhání. Dřevěná tkáň vedle lepicí části se však při vysoké teplotě rozkládá. To je pak příčinou horšího lepicího výkonu [1; 35].

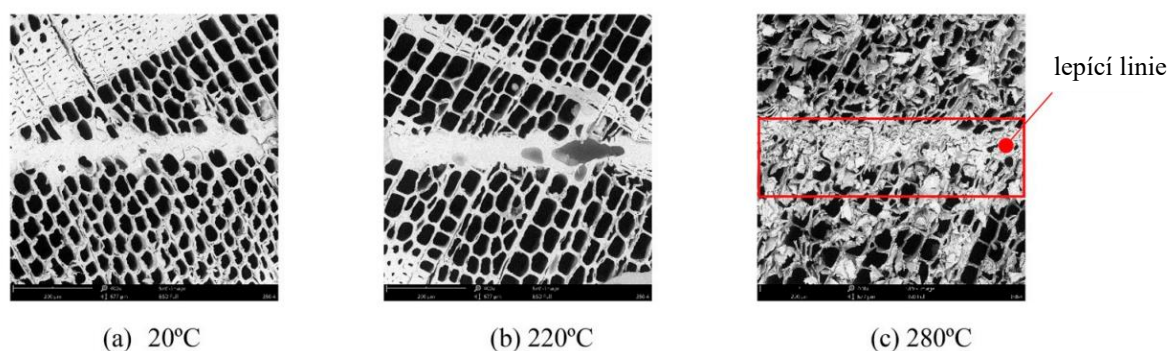
5.2.1. Melanin-močovino-formaldehydová (MUF) lepidla

Melamin-močovino-formaldehydové pryskyřice jsou běžné používané při výrobě lepeného lamelového dřeva, proto je výhodné zkoumat jejich vlastnosti v praktických aplikacích [1]. Pro vybraný experiment bylo MUF lepidlo syntetizováno v laboratoři [36]. Celkem se zkoušelo na vytvořených lepených lamelách účinnost devíti teplot (20, 50, 70, 110, 150, 200, 220, 250 a 280 °C). Pro odhalení onoho vlivu dané teploty na pevnost použitého kompozitu s lepeným spojem použili autoři infračervenou spektroskopii s Fourierovou transformací (FTIR) a rastrovací elektronovou mikroskopii SEM [1].

Výsledky FTIR ukázaly, že intenzity většiny absorbančních pásů zůstaly po tepelném zpracování při teplotách pod 150 °C téměř nezměněny. Lze tedy konstatovat, že nedošlo k žádné významné změně v chemické struktuře lepidla. Od teploty 200 °C byl už ale

identifikován pík, který je charakteristický pro izokyanátové skupiny, které začaly v chemické struktuře vznikat [1].

V rámci pevností daných vzorků došlo k výraznému snížení pevnosti ve smyku lepeného spoje při teplotách vyšších než 150 °C. Jakmile byla aplikována maximální teplota, ztratilo **MUF lepidlo** svoji funkci. I přes fakt, že u vzorku s MUF pryskyřici nenastaly žádné trhliny, jak je patrné ze snímků SEM na Obr. 4, **nebylo lepidlo schopno při vyšších teplotách udržet dřevo pohromadě** [1].



Obr. 4: SEM snímky lepené linky s lepidlem MUF [1]

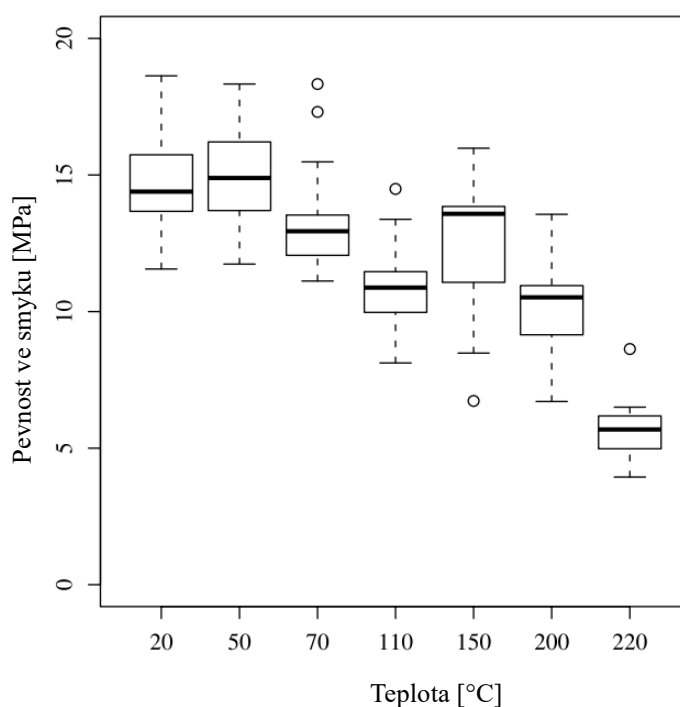
Díky jiným experimentům se zjistilo, že do 70 °C dosahovaly spoje s MUF pevnosti ve smyku nad 10 MPa, což odpovídá minimální smykové pevnosti dle evropské normy EN 301 za standardních klimatických podmínek (klasifikace typu I). Mírný pokles hodnot byl zaznamenán při 110 °C. V průměru zde pevnosti dosahovaly hodnot okolo 9 MPa. Procento porušení dřeva bylo do teploty 200 °C 100 % [37].

5.2.2. Fenol-resorcín-formaldehydová (PRF) lepidla

Liu a kol. [1] vystavili stejnému experimentu, který byl popsán již v kapitole 5.2.1 také lepidlo PRF. Zvýšené teploty byly aplikovány ve stejném duchu jako při případě MUF pryskyřice. Když byla teplota v intervalu mezi 20 a 150 °C, zůstala chemická struktura fenol-resorcín-formaldehydové pryskyřice relativně nedotčena. Změna nastala, jakmile teplota dosáhla 150 °C. Při této expozici se již chemická struktura PRF začala měnit. Porušila se totiž etherová vazba C-O-C. Do teploty 200 °C pak v PRF začalo štěpení etherové vazby pyrolýzou. Jakmile teplota dosáhla hodnot nad 200 °C, nedocházelo již ke změnám v chemické struktuře lepidla. Z výsledků pozorování vyplývá, že průměrná pevnost ve smyku tohoto lepeného spoje byla o něco menší než u masivního dřeva. Porušení dřeva

bylo vyšší než 75 %. **PRF pryskyřice tak ve vysokých teplotách funguje lépe než MUF lepidlo.**

Vynikajících smykových pevností dosahovaly spoje s PRF lepidly v celém teplotním rozsahu v rámci experimentů s lepeným bukovým dřevem. Jak je patrné na grafu Graf 2 pevnosti ve smyku překročily mezní hodnotu 10 MPa až do teploty 200 °C. Během následného hodnocení porušení se dospělo k závěru, že vzorky vykazovaly porušení ve dřevě, nikoliv ve spoji s lepidlem [37].



Graf 2: Pevnost ve smyku bukového dřeva lepeného PRF v závislosti na teplotě [37]

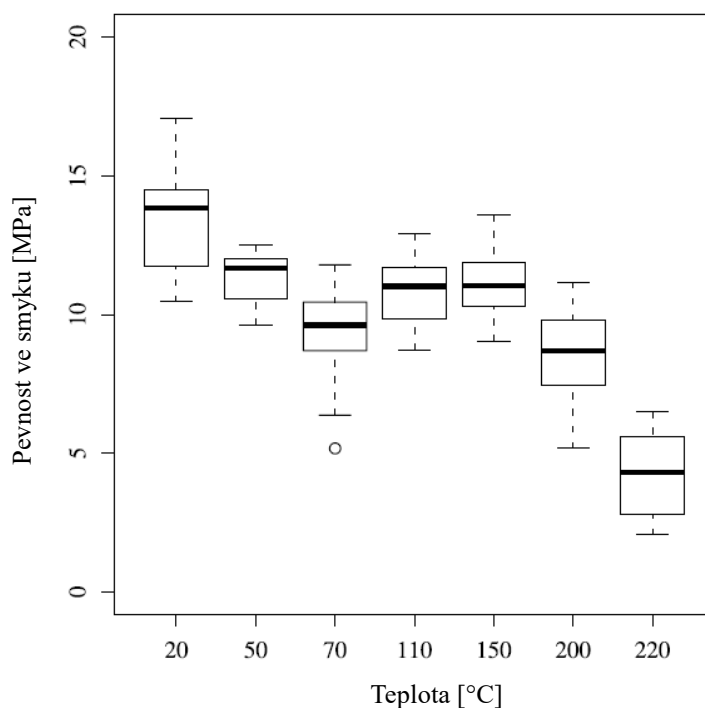
Zjištění z jiné studie naznačuje, že změny fyzikálních vlastností lepeného lamelového dřeva jsou zpravidla ovlivněny rychlostí nanášení fenol-resorcín-formaldehydových lepidel a velikostí použitého lisovacího tlaku. Tyto parametry ovlivňují zejména pevnost ve smyku dřevěných nosníků, které vzniknou z lepených lamelových profilů. Rozdíly byly zaznamenány například i u delaminace [38].

5.2.3. Polyuretanová (PUR) lepidla

Polyuretanová lepidla nabízejí dobrou houževnatost při nízkých teplotách, ale typicky degradují, pokud jsou dlouho vystaveny teplotám nad 150 °C [39]. Z nedávného šetření tepelné odolnosti u lepeného tepelně upraveného dřeva norského smrku se vyvodil závěr, že

pevnost ve smyku používaných vzorků, které byly slepeny variantami z nemodifikovaného a tepelně modifikovaného řeziva, plynule klesala se vzrůstající teplotou v intervalu 160-220 °C. Aplikace PUR snižovala pevnosti mnohem více než aplikace lepidla na bázi polyvinylacetátu, které bylo v práci také použito. Kvalita spoje PUR byla zhoršena díky vlastnosti termicky upraveného dřeva odpuzovat vodu. Jasně však výsledky dokazují fakt, že se pevnost ve smyku lepených smrkových vzorků snížila nejvíce u modifikace pouze z tepelně upraveného řeziva [40].

Použití polyuretanového lepidla v souvislosti s lepením dřevěných materiálů sloužících k termické analýze nevyšlo ani v případě dalšího výzkumu. Předmětem práce se staly desky z bukového dřeva s tloušťkou 5 mm. Velikost tloušťky se volila záměrně. Mělo tak dojít k vyloučení účinků stárnutí lepidel na povrchu dřeva. Výsledky pevností ve smyku, viz Graf 3, odhalily, že v rozsahu teplot od 50 do 200 °C lepidlo odolávalo teplotnímu zatížení. **Při teplotě 220 °C již ale lepený spoj zcela selhal, což se projevilo výrazným poklesem smykové pevnosti** [37].



Graf 3: Pevnost ve smyku bukového lepeného dřeva polyuretanovým lepidlem, výrazný pokles při 220 °C [37]

Díky výsledkům testu ze švýcarského technického institutu se zjistilo, že polyuretanová lepidla Kauresin 460 nebo například Kauranat 970 vykazují porušení koheze až při teplotách nad 150 °C. U komerčních lepidel Balcotan 107 TR a Araldite AW 136 došlo k porušení

lepidla již při teplotách okolo 60 °C [41]. Z těchto výsledků vyplývá, že nelze obecně říct, při jaké teplotě již PUR lepidlo ztratí svoji tepelnou odolnost.

5.3. Účinky dlouhodobě a krátkodobě zvýšených teplot

V rámci studie [2] se sledovala tepelná odolnost tří lepidel: PRF, PUR a emulzní polyisokyanát EPI, které byly nanесeny na přeplátované spoje smrkového dřeva. Na takto vzniklý kompozit působil tlak s velikostí 0,7 MPa při teplotě 20 °C po stanovenou dobu každého typu lepidla. Teplotní expozice, probíhající v předehřáté sušící komoře, byly vybrány dvě: 140 a 170 °C s dobou působení 20, 40, 60, 80, 180 a 1440 minut. Z výsledků tepelné analýzy, jež byla prováděna přes diferenciální skenovací kalorimetr, se ukázalo, že používaná lepidla PRF a PUR nebyla plně vytvrzena. Analýza dále odhalila, kdy nastal začátek degradace lepidel. Pro lepidlo na bázi emulzního polyisokyanátu k degradaci došlo v teplotě 135 °C, zatímco pro fenol-resorcín-formaldehydové a polyuretanové lepidlo degradace nastala kolem teploty 160 °C. Díky metodě termogravimetru bylo zřejmé, že PUR ztratilo nejmenší množství hmotnosti, opakem bylo lepidlo PRF. V oblasti mechanických vlastností experiment prokázal vyšší míru variability smykové pevnosti vzorků při účinku vyšší teploty 170 °C a doby expozice 180 minut.

Vystavení vzorků teplotě 170 °C mělo mnohem větší dopad na testovaná lepidla. Ve všech třech případech došlo k postupnému snižování pevností zkoumaných vzorků. Vliv na snížení pevností spoje byl spojen i se samotnou dobou expozice. Pokud byly vzorky vystaveny teplotě 140 °C s dobou expozice 3 hodiny, nebyla pozorována významná tepelná degradace. Jakmile však byly vzorky vystaveny této teplotě po celý den, změna již nastala. Výrazně větší vliv na hodnoty pevností ve smyku daných vzorků měla **dlouhodobá expozice při vyšší teplotě – 170 °C**. Při této expozici dokonce nastala i **úplná ztráta adheze používaných lepidel** [2].

5.4. Nové přístupy v návrzích dřevěných lepených spojů

Jelikož jsou lepidla produkty vysoce závislé na ropě, a snahou dnešní doby je hledat ekologičtější a udržitelnější řešení, přistupuje se v oblastech lepení lamelových dřevěných prvků k použití i přírodních lepidel. Bio-adhesiva jsou stále více formulována lepšími mechanickými vlastnostmi, a proto se stávají slibnou alternativou i na úrovni konstrukčních aplikací. Spoje dřevo/přírodní lepidlo mají pozitivum ve svých ekologických vlastnostech

a schopnosti odolávat značnému zatížení. V obavách tak zůstává odolnost těchto materiálů vůči nepříznivému prostředí, jako jsou vysoké teploty a vlhkost. Napomoci k tomu mohou nové přístupy v oblastech zpevnění podkladu metodou zhuštění. Takové metody zlepšují mechanické chování kompozitů. I proto se už lepené spoje dřevo/bio-adhesivní lepidlo osvědčily pro řadu průmyslových aplikací [42].

5.4.1. Lepidla na bázi taninu

Tanin je přírodní materiál, získávaný ze stromů, především v jejich měkkých tkáních, kterými jsou listy, jehličí nebo kůra. Bio-adhesiva na bázi taninu nahrazují pouze malé množství fenolu, a to z důvodu nízké nukleofility. Vytvrzování těchto lepidel jde pomocí hexamethylenového tvrdidla nebo samokondenzací. Pro oba způsoby však platí, že vyžadují dlouhé lisovací časy [42]. Tyto lepidla, na rozdíl od těch, co jsou užívány již řadu let, neuvolňují tak značné množství emisí. Obsažený hexamin se totiž nerozkládá přímo na formaldehyd a amoniak, ale na iminy, jež mají pouze jeden kladný náboj. Pokud nejsou přítomny žádné vysoce reaktivní látky se silně negativním nábojem (těmi mohou být např. resorcinol, vysoce reaktivní fenol, amid nebo amin), pak se hexamin rychle rozkládá na formaldehyd [43].

5.4.2. Lepidla na bázi ligninu

Lignin je fenolický materiál představující atraktivní nahrazení konvenčně používaných lepidel při lepení lamelových dřevěných materiálech. Použití ligninu do fenolických lepidel, jakými jsou močovino-formaldehydové nebo fenol-formaldehydové pryskyřice zajistí zmírnění ekologické stopy a lepidla se často stávají také cenově přijatelnější. Sulfátový lignin představuje nejlepší náhradu fenolu. Snaha používat pouze čistá lepidla na bázi ligninu dnes v průmyslových aplikacích odpadá. Je to způsobeno jejich vysokou korozivitou pro určitá zařízení. I přesto bylo lepidlo na bázi ligninu použito například k výrobě překližky. Z dostupných pramenů bylo vidět, že při dvojnásobném hmotnostním obsahu ligninu srovnávaného s obsahem polyethyleniminu, se podařilo dosáhnout vyšších pevností a vyšší odolnosti proti vodě [42].

5.4.3. Lepidla na bázi sacharidů

Jsou to materiály, které lze aplikovat přímo na dřevo nebo jako úprava stávajících fenol-formaldehydových a močovinoformaldehydových (UF) pryskyřic. Nejběžněji používaným sacharidem v oblasti lepení dřeva je škrob. Ten byl zkoumán ve výrobě dřevotřískových desek jako přísada do UF lepidla. Konečný produkt sice splňoval pevnostní standardy, nikoliv však dostatečnou odolnost vůči vodě [42].

5.4.4. Další lepidla na biologické bázi

Lepidel na přírodní bázi pro použití na dřevo existuje celá řada. Z nich další významnou skupinu tvoří lepidla na bázi bílkovin. Ty jsou však stále v procesu vývoje z důvodu jejich krátké doby zpracovatelnosti a nízké odolnosti proti vlhkosti [42; 43].

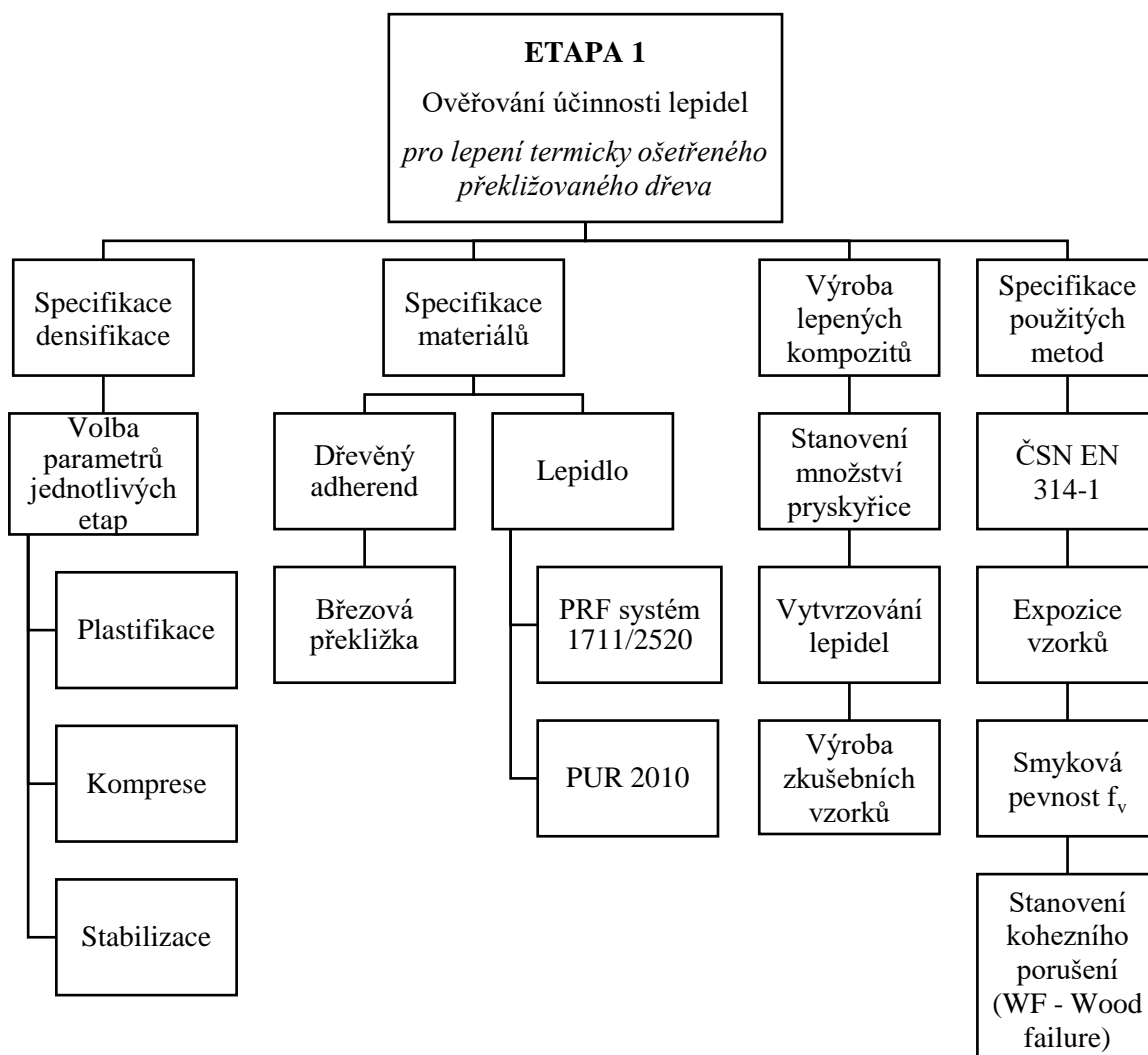
Bacigalupe a kol. studovali tepelnou odolnost proteinových lepidel ze sójového koncentrátu. Výsledky z termogravimetrické analýzy prokázaly v procesu degradace tři stupně. V prvním stupni od 35 °C do 120 °C došlo k odpařování volné a vázané vody a tím snížení hmotnosti. Proteinová lepidla dále degradovala od teploty 250 °C do 360 °C a od 430 °C do 630 °C. Jakmile však bylo do lepidla přidáno určité množství montmorillonitu, došlo k nárůstu teploty degradace, což prokázalo i mírné zlepšení tepelné stability používaného lepidla [44].

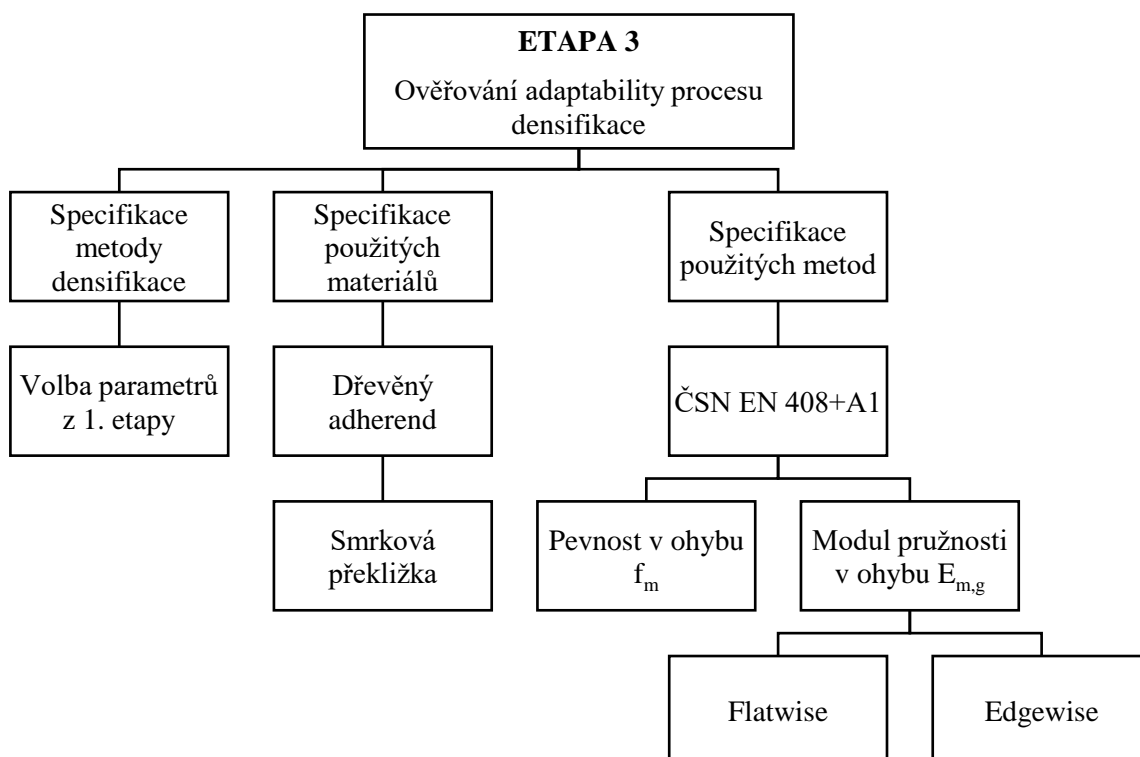
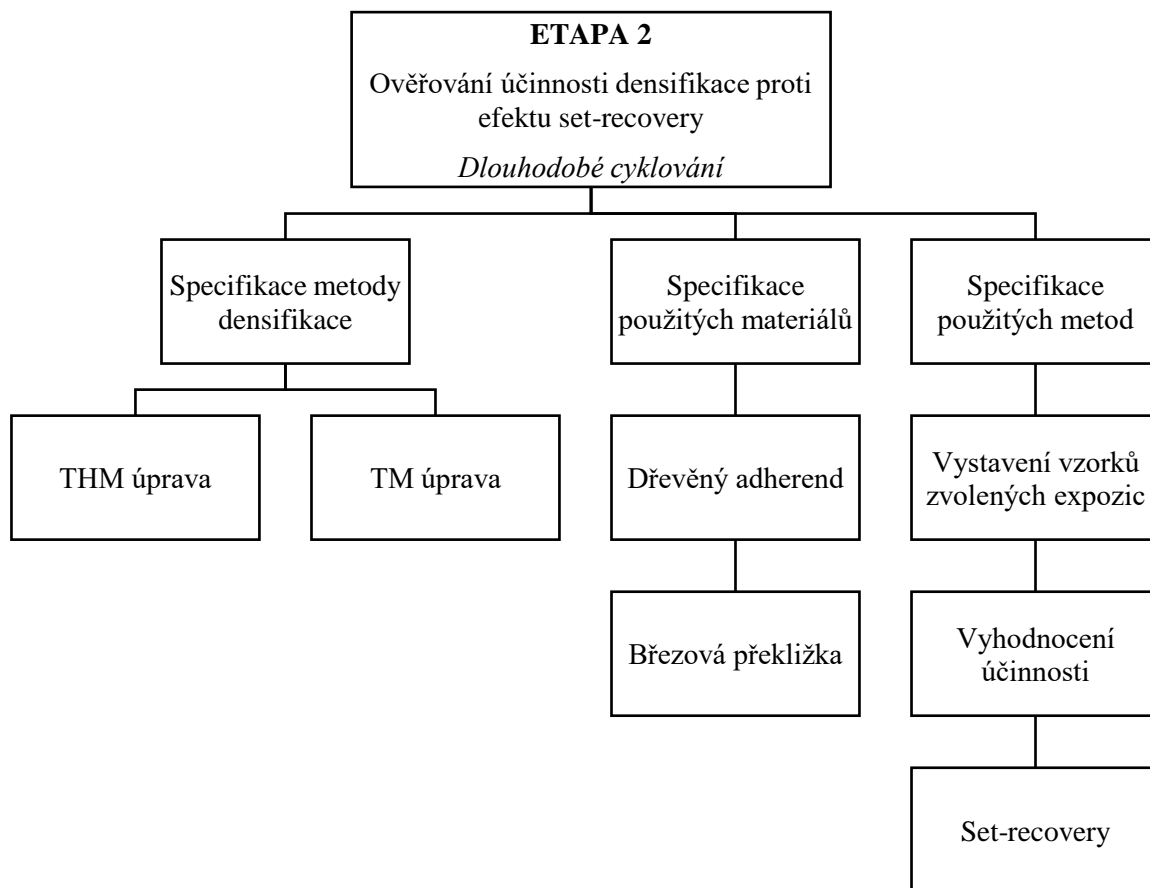
Zcela rozdílná studie prokázala, že lepidla na bázi biopolyolu z biomasy jsou tepelně méně stabilní než komerční používaná lepidla a rozkládají se při nižších teplotách. Vysvětlení spočívalo v konvenčním použití čistých polyolů s vysokým hydroxylovým číslem a začleněním síťovacích činidel do struktury polyuretanových adhesiv. Použití takovýchto bio-adhesiv se tak nedoporučuje, pokud je očekáváno vystavení kompozitního materiálu zvýšeným teplotám [45].

PRAKTICKÁ ČÁST

6. Metodika práce

Metodický postup prací je v následujícím tabulkovém schématu, při kterém jsou práce rozděleny do tří etap. V první a druhé etapě jsou navrženy právě takové práce, které povedou k naplnění cíle diplomové práce, zjišťující volbu trvanlivosti lepidla pro lepení densifikovaných materiálů. Etapa 3 pak obsahuje práce, které v obecné rovině zohledňují účinnost provedené densifikace pomocí pevnostně-tuhostních parametrů. Zde je přistoupeno oproti etapám 1 a 2 k aplikaci stejného procesu densifikace, ale při použití jiného dřevěného adherendu (smrková překližka v tl. 18 mm). Cílem této etapy je ověřit, zdali je tento proces adaptabilní pro různé druhy dřevěného sortimentu.





6.1. ETAPA 1 – Ověřování účinnosti lepidel pro lepení termicky ošetřeného překližovaného dřeva

6.1.1. Specifikace metody densifikace

Proces densifikace probíhal na pracovišti výzkumného centra Josefa Ressela v Brně Útěchově, spadajícího pod Ústav nauky o dřevě a dřevařských technologiích LDF MENDELU. Toto pracoviště disponuje jednoetážovým hydraulickým lisem typu HL 400 od firmy STROZATECH s. r. o., Brno. Díky topným deskám o velikosti 1 300×1 200×40 mm lze v lisu získat teploty od 90 do 220 °C. Tento hydraulický lis byl v procesu densifikace využit i při dalších etapách této práce.

Volba parametrů pro jednotlivé etapy densifikace (plastifikace, komprese, stabilizace výsledného stavu) proběhla na základě optimalizace této úpravy v předchozím výzkumu. Překližovaný materiál byl umístěn do hydraulického lisu po dvoutýdenní aklimatizaci v klimatické komoře s prostředím relativní vlhkosti $(85\pm 5)\%$ a teplotou $(30\pm 2)\text{ °C}$. V tomto prostředí se podařilo dosáhnout ustálení vlhkosti překližovaného materiálu na cca 17 %. Parametry stlačení odpovídaly teplotě 180 °C s tlakem 3,3 MPa po dobu 10 minut. Stabilizace výsledného stavu probíhala 5 hodin pod tlakem 3 MPa na 180 °C. Po ní následovalo chlazení na teplotu 60 °C při stejném tlaku po dobu 16 hodin.

Pro zajištění odvodu páry během komprese a snaze potlačit vznik případné delaminace, byl překližovaný deskový materiál umístěn mezi nerezové síto se speciálním úpletem. Tím bylo zajištěno hladkého průběhu densifikace a nedošlo tak ke znehodnocení výsledného materiálu.

Tab. 1: Souhrn technických parametrů použitého hydraulického lisu HL 400 [15]

Rozměry topných desek [mm]	1300×1200×40
Příkon topných desek [kW]	62,4
Teplota topných desek [°C]	90-220
Specifický tlak [MPa]	3,35 (na ploše 1200×1000 mm)
Světlost etáže [mm]	400
Celková lisovací síla	4 020 kN



Obr. 5: Ukázka densifikace březových překližek v nerezovém sítu se speciálním úpletem pro zajištění odvodu páry pro potlačení delaminace (LDF MENDELU Brno)

6.1.2. Dřevěný adherend

Březová překližovaná deska

Pro výrobu vzorků byla vybrána březová 7-vrstvá překližovaná deska, surová. Používaný plošný materiál měl rozměry 630×425 mm a tloušťku 9 mm. Překližovaná deska byla tvořena svazkem dřív, které byly navzájem na sebe orientované o 90 °C a slepené pomocí fenol-formaldehydové pryskyřice. Obecně lze konstatovat, že překližka se pyšní zejména vysokými pevnostmi, tvarovou stabilitou a pružností při nízké objemové hmotnosti. Výrobce, od kterého byl překližovaný materiál pořízen, uvedl, že se jedná překližovanou desku jakosti CP/CP a třídou lepení 3 (AW 100). Únik formaldehydu odpovídá dle ČSN EN 1084:1997 třídě A (E1).

Tab. 2: Vlastnosti překližovaného materiálu dle výrobce

Varianta použití		pro PRF	pro PUR
Tloušťka [mm]		9	
Počet vrstev		7	
Orientační objemová hmotnost při 20 °C/65% RH [kg/m ³]		700	625
Pevnost v ohybu, 4 bodový ohyb (směr vláken povrchové dýhy)	podélná	53,1 N/mm ²	
	příčná	32,9 N/mm ²	
Tloušťková tolerance [mm]		+0,5/-0,2	

6.1.3. Lepidla pro aplikaci do kompozitního systému překližovaná deska/překližovaná deska

Výsledný dřevěný kompozitní materiál byl vytvořen dvěma březovými překližovanými deskami navzájem slepenými mezi sebou. Pro vytvoření lepeného spoje byly vybrány dva druhy lepidel: dvousložkové fenol-resorcín-formaldehydové **lepidlo 1711 s tužidlem 2520** a jednosložkové polyuretanové **lepidlo PUR 2010** (výrobce AkzoNobel).

PRF systém 1711/2520

Lepidlo typu I dle EN 301, které má schopnost vytvrdit za normální teploty v neutrálním prostředí, se vyznačuje se dobrou odolností proti vlhkosti a povětrnostním vlivům [46].

Tab. 3: Technické údaje fenol-resorcín-formaldehydového systému 1711/2520 [46]

Produkt	1711	2520
	lepidlo	tužidlo
Pevnostní stav	kapalný	kapalný
Obsah sušiny [%]	54-57	-
Vytvrzování [°C]	15-30	
Viskozita při 25 °C [mPa·s]	3 000-8 000	5 000-13 000
Hustota při 25 °C [g/cm ³]	1,15	1,20
Mísící poměr s tužidlem	hmotnostně 100:15	
Doporučené množství lepidla [g/m ²]	250-450	

PUR lepidlo 2010

Jednosložkové polyuretanové lepidlo soudržné pevnosti, pružnosti a dobré houževnatosti při nízkých teplotách [47]. Dobře se hodí pro obtížně lepitelné materiály a pro lepení dřeva s vysokým obsahem vlhkosti, i při nízkých teplotách [48].

Tab. 4: Technické údaje polyuretanového lepidla 2010 [48]

Produkt	2010
Pevnostní stav	kapalný
Barva	nažloutlá
Teplotní odolnost [°C]	-40 až 80
Viskozita při 25 °C [mPa·s]	2 000-3 500
Hustota při 25 °C [g/cm ³]	1,14
Doporučené množství lepidla [g/m ²]	250-300

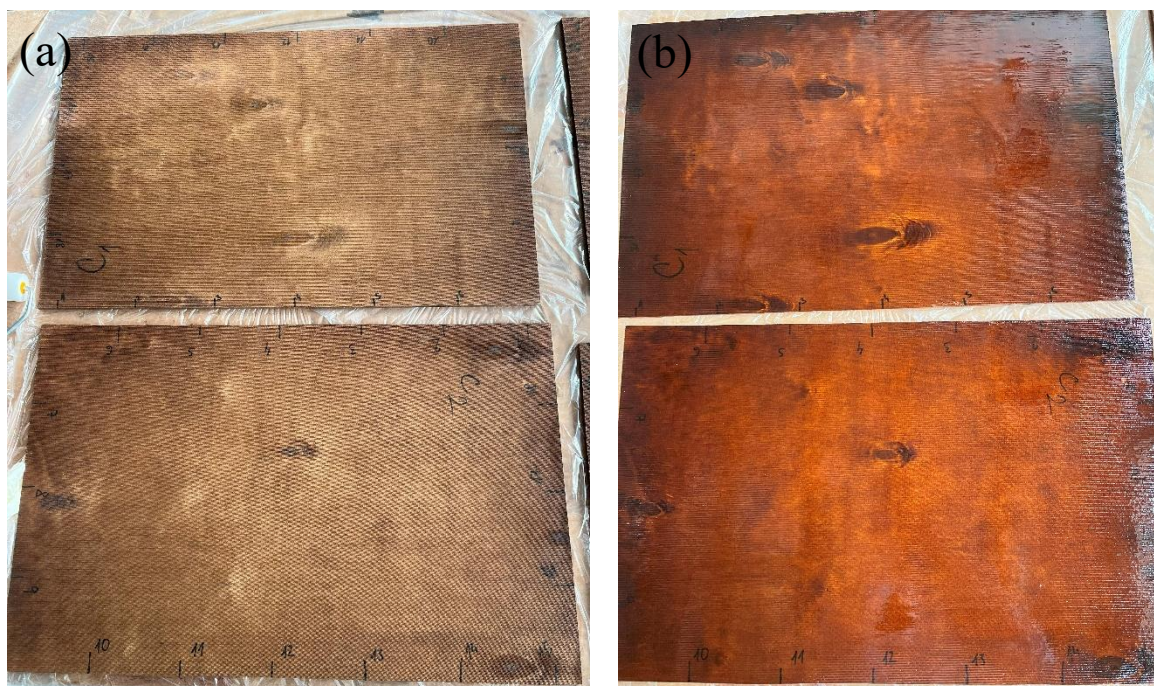
6.1.4. Příprava zkušebních vzorků

Pro výrobu zkušebních těles byly tedy vytvořeny kombinace kompozitních systémů ze dvou březových densifikovaných překližovaných desek lepených adhesivou PRF a PUR. Jako referenční varianta byly vytvořeny dva systémy z nezhuštěných březových překližovaných desek s aplikací výše zmíněných pryskyřic v množství 350, resp. 300 g/m², pro vytvoření dostatečně silného spoje.

V obou případech adhesiv PRF a PUR byly pryskyřice aplikovány po procesu zhuštění při teplotě cca 20 °C, která odpovídá vytvrzovací teplotě uváděné výrobcem. V případě PRF systému 1711/2520 byly nejprve důkladně smíchány obě složky pryskyřice a poté rovnoměrně nanášeny na překližované desky pomocí válečku. Při nanášení lepidla se kladl důraz na dostatečně silnou vrstvu na obou plochách překližovaných desek, aby bylo zajištěno řádného slepení. Metoda nanášení lepidla válečkem byla použita i pro variantu s polyuretanovou pryskyřicí 2010. Slepené desky byly následně vloženy do hydraulického lisu HL 400, aby došlo k vytvrzení nanášeného lepidla. Vytvrzování proběhlo pod lisovacím tlakem 1,10 MPa (resp. 3,70 MPa pro referenční variantu) po dobu 8 hodin za laboratorních podmínek. Díky tomu se odstranilo i přebytečného množství lepidla.

Tab. 5: Srovnání skutečného stavu lepení pro obě adhesiva

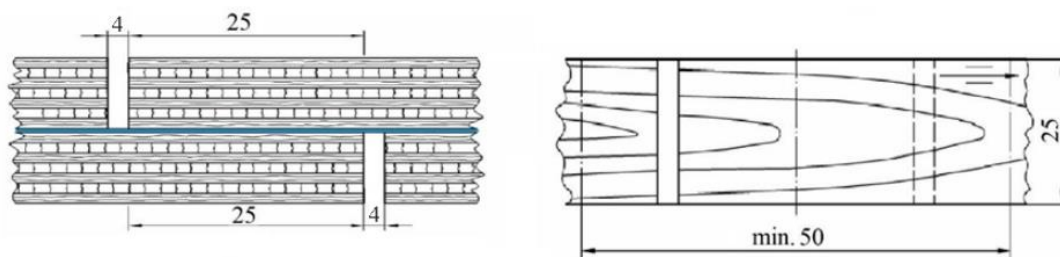
Adhesivum		PRF	PUR
Plocha desky [m ²]		0,25	
Požadavek na množství lepidla [g/m ²]		350	300
Výsledné množství pro dvojici desek [g]	Lepidlo 1711	251,1	-
	Tužidlo 2520	37,6	-
	Lepidlo 2010	-	150
Lisovací tlak [MPa]	reference	3,70	
	densifikace	1,10	
Doba lisování		8 hodin	



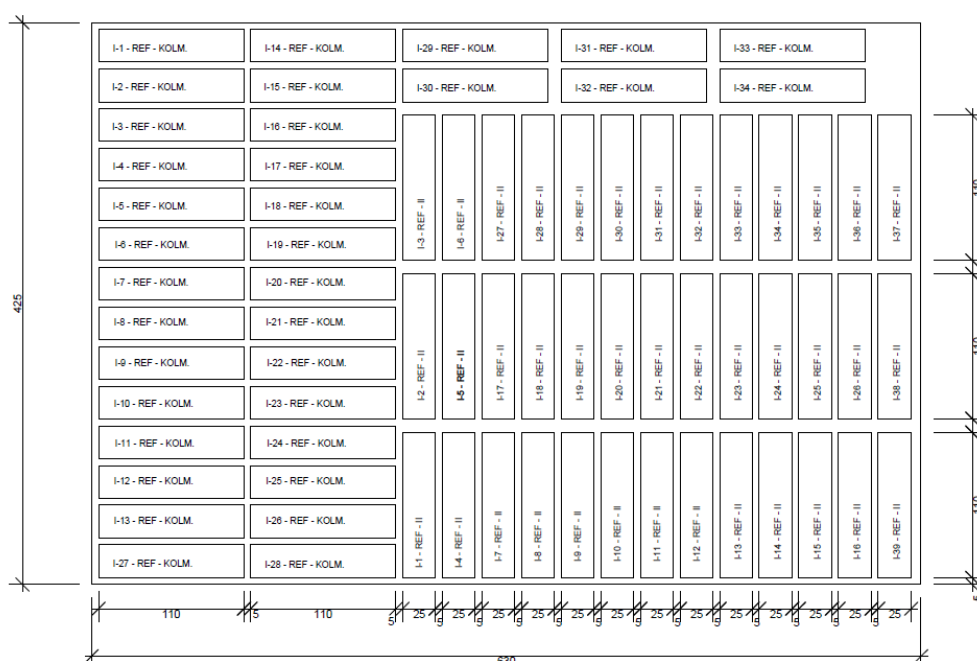
Obr. 6: Ukázka densifikované překližky (a) a následný způsob lepení systémem PRF 1711/2520 (b)

Po důkladném vytvrzení lepidla byly z desek rozmanipulovány zkušební vzorky s rozměry 25×110 mm v podélném i příčném směru pro stanovení zkoušky pevnosti ve smyku (viz Obr. 8). Celkem vzniklo 8 sad vzorků pro každou kombinaci směru vláken a lepeného spoje densifikovaných, resp. referenčních překližovaných desek po cca 80 zkušebních vzorcích v jedné sadě. Každý vzorek byl opatřen zářezy ve vzdálenosti 25 mm,

čož odpovídá délce smykové plochy uváděné normou ČSN EN 314-1:2005 [49]. Ty byly provedeny tak, aby končily ve zkoušené lepené spáře viz Obr. 7.



Obr. 7: Schéma úpravy vzorků – zářezy pro lepený (modrá linie na levém obrázku) kompozitní materiál (hodnoty uvedeny v mm)



Obr. 8: Návrh zkoušebních vzorků na referenčním lepeném kompozitním systému překližovaná deska/překližovaná deska

6.1.5. Specifikace použitých metod

U zkoušebních těles byla provedena zkouška smykové pevnosti dle ČSN EN 314-1:2005, která uvádí tvar a rozměry vzorků, způsob expozice, ve kterých jsou zkoušební vzorky uloženy před samotným stanovením smykové pevnosti a princip metody.

Zkoušební vzorky od každé z 8 sad byly před samotným stanovením smykové pevnosti rozděleny na čtyři skupiny vzorků tak, aby mohly být upraveny vystavením ve všech stanovených prostředích:

- i) ponořením do vody s teplotou (20 ± 3) °C na 24 hodin a následným zabalením ve streč fólii do doby provádění zkoušky,
- ii) ponořením do vařící vody na 6 hodin, po kterých následovalo ochlazení ve vodě s teplotou (20 ± 3) °C do následujícího dne,
- iii) ponořením do vařící vody na 4 hodiny, poté uložením 20 hodin v sušárně při teplotě (60 ± 3) °C, následovalo opakované ponoření do vařící vody na 4 hodiny a poté závěrečné ochlazením ve vodě (20 ± 3) °C do dalšího dne,
- iv) ponořením do vařící vody na 72 hodin v pravidelných intervalech po 8 hodinách, následné ochlazení ve vodě (20 ± 3) °C po dobu 1 týdne.

Podstata smykové zkoušky spočívá v postupném tahovém namáhání na upravených vzorcích, které jsou souměrně uloženy v čelistech lisu. Pro zkoušku byl využit zkušební lis M350-20 CT, kterým disponuje laboratoř Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT v Brně. V důsledku tahového namáhání ve zkoušené smykové ploše nastane porušení dřevěného materiálu nebo lepeného spoje. Stanovení smykové pevnosti je po zkoušce doplněno o výsledek kohezního porušení dřevní části.



Obr. 9: Referenční zkušební vzorek upnutý mezi drážkovými čelistmi tahového zkušebního lisu M350-20 CT

Smyková pevnost byla stanovena na celkem 522 vzorcích s délkou 110 mm a šířkou 25 mm. Po zkoušce pevnosti ve smyku došlo na vizuální stanovení kohezního porušení dřevní části překližované desky. Podíl kohezního porušení dřevní části a porušení lepeného spoje byl vyhodnocen s pomocí přílohy A normy ČSN EN 314-1:2005. Norma specifikuje, že kohezní porušení je u zkušebních vzorků udáváno procentuálním porušením dřevní části v intervalu 0 až 100 %, s přesností na 5 % [49].



Obr. 10: Ukázka porušení vzorků (lepidlo PRF) po namáhání v místě smykové plochy, horní referenční vzorek se 30% kohezním porušením, spodní densifikovaný vzorek se 100% kohezním porušením v dřevní části vzorku



Obr. 11: Ukázka porušení vzorků (lepidlo PUR) po namáhání v místě smykové plochy, horní ref. vzorek s 80% kohezním porušením, spodní densifikovaný vzorek se 100% kohezním porušením v dřevní části vzorku

6.2. ETAPA 2 – Ověření účinnosti densifikace proti efektu set-recovery

V této etapě je provedeno ověření účinnosti zvolených typů densifikačních úprav (hydrotermické mechanické a termické mechanické) pomocí jejich cyklování ve vlhkém prostředí. Zkušebních vzorků byly vystavovány expozicím s různou relativní vlhkostí a teplotou prostředí po dobu 18 měsíců. Densifikační materiál má schopnost obnovit svůj původní objem po uvolnění aplikovaného tlaku. Pro sledování deformací a změn ve struktuře materiálu bylo přistoupeno pomocí parametru set-recovery.

6.2.1. THM a TM densifikace, materiál

Obě metody zhuštění, které byly aplikovány na překližovaném materiálu, se lišily v detailním provedení plastifikace před procesem úpravy a stabilizací výsledného zhuštěného stavu. Stlačení deskového materiálu probíhalo v obou případech působením lisovacího tlaku 3 MPa při teplotě 180 °C po dobu 10 minut. Kombinace prováděných úprav v jednotlivých krocích (včetně referenční varianty bez zhuštění) je pro názornost uvedena na následující tabulce Tab. 6.

Tab. 6: Jednotlivé skupiny úprav [15]

Skupina		Plastifikace	Komprese	Stabilizace	
1	REF	-	-	-	
2	THM (1)	2 týdny RH 90 %, 30 °C	10 minut 3 MPa, 180 °C	5 hodin 180 °C, v lise	poté uvolnění
3	THM (2)				chlazení dalších 16 hodin v lise
4	TM (1)	poté odtížení			
5	TM (2)	10 minut 180 °C			chlazení dalších 16 hodin v lise

Březová překližovaná deska

Z dodaného panelu březové překližky (stejný výrobce jako v ETAPĚ 1) o rozměru 1250×2500 mm bylo nařezáno pět desek s velikostí 625×400 mm. Ty byly podrobeny jednotlivým variantám úprav. Následně proběhlo naformátování na zkušební vzorky. Pro další průběh prací byly využity zkušební vzorky s velikostí 50×50 mm v celkovém počtu 36 ks.

6.2.2. Specifikace prováděné zkoušky

Stanovení bobtnání/zotavení – parametr set-recovery

Zkouška navazuje na již předem započatý výzkum [15]. Zkušební vzorky byly nejprve kondicionovány v klimatizační komoře s prostředím relativní vlhkosti vzduchu (65 ± 5) % a teplotou (20 ± 2) °C. Dále byly dle normy ČSN EN 317:1995 vysušeny při teplotě (103 ± 2) °C do konstantní hmotnosti [50]. Po dosažení konstantní hmotnosti byly vzorky postupně vystavovány zvoleným expozicím. V tomto případě docházelo k ukládání vzorků do vodní lázně, pro zjištění maximálního bobtnání. Dále byly vzorky ponechány dlouhodobě v laboratorním prostředí, případně byly umístovány do exikátoru, který obsahoval nasycený roztok dusičnanu hořečnatého $Mg(NO_3)_2$ a zajistil tak prostředí s relativní vlhkostí 68 %. Ten byl připravený dle přílohy B normy ČSN EN ISO 12571. Ta obsahuje tabulku rozpustnosti různých látek při daných teplotách [51]. V pravidelných intervalech docházelo k měření tloušťky mikrometrickým šroubem a k vážení na laboratorních vahách pro získání hmotnosti zkušebních vzorků po proběhlé expozici.

Tab. 7: Rozpustnost různých látek při daných teplotách – výňatek z normy [51]

Látka	Krystalická voda	Rozpustnost	
		při teplotě vody (°C)	g na 100 ml destilované vody
Dusičnan hořečnatý $Mg(NO_3)_2$	$6 \cdot H_2O$	20	125

Ověření schopnosti plastifikované dřevěné buňky zotavit se do původního stavu proběhlo při dosažení stejné vlhkosti vzorků, která byla stanovena na počátku měření.

Parametr set-recovery charakterizuje stav, kdy dojde ve zhuštěném dřevě k uvolnění krystalické celulózy z fixované kondice, která vznikla ochlazením pod teplotu skelného přechodu ligninu, hemicelulózy a semikrystalické celulózy. Je definován vztahem (1):

$$SR = \left[\frac{(t_n - t_f)}{t_n} \right] \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

kde: t_n je tloušťka zhuštěného dřevěného materiálu po replastifikaci v mm,

t_f je konečná tloušťka získaná bezprostředně po uvolnění lisu v mm [52].

6.3. ETAPA 3 – Ověření adaptability procesu densifikace

6.3.1. Specifikace použitého materiálu

Smrková překližovaná deska

Výroba zkušebních vzorků probíhala z panelu smrkové překližované desky 7-vrstvé, surové s rozměry 2 500×1 250 mm v tloušťce 18 mm. Výrobce smrkového překližovaného panelu deklaruje jakost C/C s třídou lepení 2. Únik formaldehydu odpovídá dle ČSN EN 712-2 emisní třídě E1. I přesto, že je lepení desky vodovzdorné, nedoporučuje výrobce použití do nechráněného venkovního prostředí.

Tab. 8: Vlastnosti překližovaného materiálu dle výrobce

Tloušťka [mm]		18
Počet vrstev		7
Orientační objemová hmotnost [kg/m³]		700
Pevnost v ohybu, 4 bodový ohyb [N/mm²]	podélná	30-45
	příčná	20-25
Modul pružnosti [N/mm²]	podélně	5 500-8 500
	příčně	3 500-5 500
Kvalita lepení [N/mm²]		0,8-1,2

Z dodaného panelu smrkové překližované desky byly naformátovány zkušební vzorky s délkou 950 mm a šířkou v průměru 114 mm. Ty byly vloženy do klimatizační komory, pro zajištění navlhnutí pro proces termo-hydro-mechanické densifikace, po dobu 5 dnů v podmínkách relativní vlhkosti 90 % a teploty 30 °C.



Obr. 12: Uložení vzorků smrkové překližované desky v prostředí 90 %/30 °C

6.3.2. Stanovení pevnostně tuhostních parametrů

Rozměry zkušebních těles odpovídaly požadavkům normy ČSN EN 789. Ke stanovení pevnostně tuhostních parametrů bylo orientačně přistoupeno v souladu s postupem definovaným v normě ČSN EN 408+A1. Zkušební vzorky jsou zatěžovány ohybovým momentem přenášeného zatěžovacími břemeny, ve vzdálenosti rovnající se 18násobku výšky tělesa, a podpěrnými válečky zkušebního přístroje. Během zkoušení je zaznamenáno nejvyšší dosažené zatížení. Na základě získaných hodnot byl proveden výpočet pevnosti v ohybu pro jednotlivá zkušební tělesa a globálního modulu pružnosti [53].

Modul pružnosti v ohybu byl stanoven přepočtem naměřených hodnot z dráhy příčnicku. Na následující fotografii (Obr. 13) je zobrazena zkouška pevnosti v ohybu při působení čtyřbodového namáhání prováděná na zkušebním lisu, který disponuje zátěžovou kapacitou 50 kN, ve vědeckovýzkumném centru AdMaS.

V kontextu zkoušek byl modul pružnosti sledován dle orientace materiálu – edgewise, flatwise. Edgewise se týká varianty namáhání, při které je materiál zatěžován kolmo k jeho

tloušťce. Tato orientace způsobí, že je materiál náchylný k ohybu kolem své hranice. Naopak flatwise vyjadřuje tendenci k ohybu ve směru roviny materiálu a dochází tak k zatěžování kolmo k šířce zkušebního tělesa.



Obr. 13: Zkouška pevnosti v ohybu, působení 4–bodového namáhání

Zkouška byla provedena při laboratorních podmínkách na 18 zkušebních vzorcích smrkových překližovaných desek. Zkoušené vzorky se lišily v použité tepelné úpravě – 9 vzorků tvořilo podklad pro stanovení referenčních hodnot, jelikož byly vzorky zkoušeny v surovém stavu bez tepelné úpravy. Zbylá polovina vzorků prošla procesem densifikace.

7. Výsledky experimentu

V níže uvedených tabulkách jsou průměrné hodnoty výsledků z jednotlivých zkoušek prováděných na různém počtu vzorků překližovaných desek z březového (etapy 1 a 2) a vzorků překližovaných desek ze smrkového dřeva (etapa 3). Popis tabulek je v rámci etapy zjišťující účinnost vybraných lepidel doplněn o variantu použité tepelné úpravy a aplikované pryskyřice.

7.1. Účinnost vybraných lepidel

7.1.1. Parametry densifikace

U všech densifikovaných březových překližovaných desek byla zjišťována tloušťka před vložením do lisu a poté po samotné procesu úpravy za účelem vyhodnotit míru aplikovaného zhuštění dle kompresního poměru. Měření těchto tloušťek probíhalo za standartním laboratorních podmínek. Vstupní vlhkost překližovaných desek, při kterých docházelo ke stlačení, byla 17 %.

V Tab. 9 je uvedena průměrná hodnota kompresního poměru překližovaných desek pro jednotlivé varianty lepidel – PRF a PUR. Tloušťky se měřily v celkem 18 reprezentativních místech po celém obvodu překližované desky viz Obr. 6.

Tab. 9: Kompresní poměr pro jednotlivé varianty

Označení desky	Kompresní poměr CR [%]	Směrodatná odchylka [%]
C-PRF	41,1	0,9
D-PUR	44,7	1,4

7.1.2. Pevnost ve smyku

Výsledky pevnosti ve smyku a stanovení kohezního porušení dřeva smykové plochy byly naměřeny na 522 zkušebních vzorcích, které byly rozděleny mezi čtyři expozice, kterým byly zkušební vzorky vystaveny. Smykové namáhání v této zkoušce bylo vyvozováno buď v místě lepeného spoje (ověření únosnosti lepeného spoje PRF, respektive PUR) nebo v místě překližované desky.

Expozice I

Tabulka Tab. 10 uvádí průměrné hodnoty pevností ve smyku a kohezního porušení dřeva smykové plochy pro 134 zkušebních vzorků po účinku prostředí vody s teplotou (20 ± 3) °C po dobu 24 hodin.

Tab. 10: Průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení kompozitních systémů po expozici I

Typ dřeviny	Směr vláken	Typ tepelné úpravy	Typ lepidla ve spoji	Pevnost ve smyku [N/mm ²]		Průměrná hodnota kohezního porušení dřeva [%]
				Průměrná hodnota f_v	Směrodatná odchylka	
Březová překližka	Rovnoběžný	REF	PRF	3,95	0,86	65
			PUR	4,98	0,85	70
		DENS.	PRF	2,86	0,43	30
			PUR	3,51	0,35	85
	Kolmý	REF	PRF	2,37	0,59	100
			PUR	3,08	0,59	50
		DENS.	PRF	1,69	0,40	100
			PUR	1,99	0,52	90

Expozice II

Následující tabulka Tab. 11 uvádí průměrné hodnoty smykové pevnosti a kohezního porušení dřeva ze souboru 139 zkušebních vzorků po vystavení účinku vařící vody po dobu 6 hodin, poté došlo k ochlazení ve vodě (20 ± 3) °C.

Tab. 11: Průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení kompozitních systémů po expozici II

Typ dřeviny	Směr vláken	Typ tepelné úpravy	Typ lepidla ve spoji	Pevnost ve smyku [N/mm ²]		Průměrná hodnota kohezního porušení dřeva [%]
				Průměrná hodnota f_v	Směrodatná odchylka	
Březová překližka	Rovnoběžný	REF	PRF	4,26	0,79	70
			PUR	4,58	0,66	85
		DENS.	PRF	2,57	0,41	80
			PUR	3,01	0,23	80
	Kolmý	REF	PRF	2,74	0,49	100
			PUR	3,32	0,67	75
		DENS.	PRF	1,72	0,36	100
			PUR	2,59	0,34	100

Expozice III

Průměrné hodnoty smykových pevností a kohezního porušení po účinku 3. expozice byly stanoveny ze 125 vzorků. Prostředí spočívalo ve střídání cyklů: vařící voda po dobu 4 hodin, poté 20 hodin v sušárně při (60±3) °C, následné ponoření do vařící vody na 4 hodiny a závěrečné ochlazení ve vodě (20±3) °C do dalšího dne.

Tab. 12: Průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení kompozitních systémů po expozici III

Typ dřeviny	Směr vláken	Typ tepelné úpravy	Typ lepidla ve spoji	Pevnost ve smyku [N/mm ²]		Průměrná hodnota kohezního porušení dřeva [%]
				Průměrná hodnota f_v	Směrodatná odchylka	
Březová překližka	Rovnoběžný	REF	PRF	4,70	0,49	80
			PUR	5,59	0,52	100
		DENS.	PRF	2,88	0,54	95
			PUR	3,52	0,30	100
	Kolmý	REF	PRF	2,73	0,49	95
			PUR	3,14	0,43	100
		DENS.	PRF	1,61	0,41	90
			PUR	2,10	0,32	100

Expozice IV

V rámci poslední expozice (vařící voda po dobu 72 hodin a následné ochlazení ve vodě (20 ± 3) °C) bylo zkoušeno 124 vzorků, ze kterých byly stanoveny průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení, a které jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 13.

Tab. 13: Průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení kompozitních systémů po expozici IV

Typ dřeviny	Směr vláken	Typ tepelné úpravy	Typ lepidla ve spoji	Pevnost ve smyku [N/mm ²]		Průměrná hodnota kohezního porušení dřeva [%]
				Průměrná hodnota f_v	Směrodatná odchylka	
Březová překližka	Rovnoběžný	REF	PRF	4,28	0,85	80
			PUR	5,10	0,71	95
		DENS.	PRF	3,11	0,43	85
			PUR	3,42	0,44	100
	Kolmý	REF	PRF	2,37	0,52	90
			PUR	3,36	0,32	90
		DENS.	PRF	1,88	0,26	100
			PUR	2,41	0,39	85

7.1.3. Způsob porušení lepeného spoje

Ověření způsobu porušení lepeného spoje bylo provedeno na základě hodnocení místa porušení lepených překližovaných deskových materiálů adhesivy PRF 1711//2520 a PUR 2010. To bylo navíc doplněno o další variantu typu lepidla v kompozitním materiálu březové překližované desky. Na těchto překližovaných deskách, které měly hustotou $740 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ při teplotě 20 °C a 65% relativní vlhkosti, byla nanášena epoxidová pryskyřice Biresin CR82 od firmy Sika [54].

Březové překližované desky ve variantě kompozitního systému: překližovaná deska/epoxidová pryskyřice měly před procesem densifikace vstupní vlhkost 27 %. Té bylo dosaženo vystavením materiálu účinku prostředí v klimatizační komoře s teplotou 30 °C a relativní vlhkosti 85 % po dobu 2 týdnů. Teplota, tlak i doba densifikace pro epoxid/densifikovaný překližovaný materiál zůstaly stejné, tj. při teplotě 180 °C, tlaku 3,3 MPa, po dobu 10 minut. Stabilizace výsledného materiálu probíhala pod tlakem 3 MPa na 180 °C po dobu 5 hodin, po kterých bylo přistoupeno k 16hodinovému chlazení pod tlakem 3 MPa na teplotu cca 60 °C.

Na zhuštěný materiál byl aplikován nános epoxidového lepidla v doporučeném množství $350 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ pomocí válečku. Nejprve však muselo dojít k řádnému smíchání obou komponent – lepidla Biresin CR82 s tvrdidlem CH80-2. Aby došlo k řádnému vytvrzení naneseného lepidla ve vyvíjeném kompozitním systému březová překližka/epoxidová pryskyřice, byl na materiál vyvíjen v hydraulickém lisu tlak $0,8 \text{ MPa}$ po dobu 12 hodin při laboratorních podmínkách.

Z vyvíjeného kompozitu byla posléze naformátovaná sada vzorků dle shodného schématu, který byl uveden v metodice práce (kap. 6.1.4). Podkladem pro vyhodnocení dané problematiky byl záznam místa rozrušení upravených zkušebních vzorků po tahovém namáhání.

Výsledné hodnoty, zdali došlo k porušení v dřevěném adherendu nebo v lepeném spoji pro danou variantu aplikovaného lepidla, jsou srovnány v následující tabulce Tab. 14.

Tab. 14: Procentuální porušení vyvíjených kompozitů v dřevěném adherendu, resp. v lepeném spoji vycházející z celého souboru vzorků pro jednotlivý typ lepidla

Typ lepidla	Typ porušení	Procentuální porušení [%]
PRF systém 1711/2520	dřevěný adherend	91
	lepený spoj	9
PUR 2010	dřevěný adherend	89
	lepený spoj	11
Biresin CR 82	dřevěný adherend	36
	lepený spoj	64

7.2. Účinnost densifikace proti efektu set-recovery

Pro stanovení dlouhodobého cyklování a schopnosti densifikovaného materiálu odolávat účinkům zvýšené vlhkosti a navrácení se k původním rozměrům bylo použito celkem 36 zkušebních vzorků velikosti $50 \times 50 \text{ mm}$. Ty byly vystaveny po dobu 18 měsíců různým expozicím, v průběhu kterých docházelo při laboratorních podmínkách k měření změn jejich tloušťek a hmotností. Následující tabulky zobrazují vývoj měření průměrných tloušťek zkušebních vzorků pro každý typ densifikační úpravy. V popisu tabulek je také zohledněna příslušná expozice, po které toto měření změny tloušťky vzorků proběhlo v laboratorních podmínkách.

Tab. 15 uvádí průměrné hodnoty naměřených tloušťek zkušebních vzorků pro prvních 10 měsíců dlouhodobého cyklování.

Tab. 15: Průměrné hodnoty tloušťek vzorků jednotlivých densifikovaných úprav po vystavení danému prostředí pro prvních 10 měsíců měření

Datum měření	19.05.2022	20.05.2022	27.07.2022	18.08.2022	25.01.2023	15.02.2023	08.03.2023
Expozice	Sušárna 105 °C	Ustálení RH 65 %, 20 °C	Max. bobtnání	Exikátor RH 54 %, 22 °C	Lab. podmínky	Exikátor, RH 71 %, 20 °C	Exikátor, Mg(NO ₃) ₂ RH 68 %, 21 °C
Označení úpravy	Průměrná hodnota tloušťky t [mm]						
REF	9,00	9,14	10,04	9,71	9,08	9,16	9,25
THM (1)	5,54	5,62	6,10	5,63	5,37	5,34	5,45
THM (2)	5,44	5,51	5,93	5,53	5,21	5,20	5,38
TM (1)	6,97	7,06	7,84	7,63	7,02	7,07	7,17
TM (2)	7,20	7,36	8,49	7,89	7,33	7,46	7,50

Níže uvedená tabulka pak dokresluje zbylé průměrné hodnoty naměřených tloušťek na zkušebních vzorcích 50×50 mm po dobu dalších 8 měsíců.

Tab. 16: Průměrné hodnoty tloušťek vzorků jednotlivých densifikovaných úprav po vystavení danému prostředí pro zbývajících 8 měsíců měření

Datum měření	22.03.2023	27.04.2023	31.05.2023	29.06.2023	11.08.2023	16.08.2023	02.11.2023
Expozice	Uložení ve vodě při lab. podmínkách			Přirozené vysušování		Sušárna	Ověření vlhkosti
Označení úpravy	Průměrná hodnota tloušťky t [mm]						
REF	9,95	10,01	9,97	9,24	8,88	8,96	9,02
THM (1)	5,84	6,26	6,29	5,60	5,37	5,32	5,40
THM (2)	5,78	6,20	6,25	5,55	5,31	5,25	5,33
TM (1)	7,84	8,05	7,98	7,23	6,93	6,96	7,09
TM (2)	8,28	8,68	8,69	7,72	7,34	7,53	7,55

Průměrné hodnoty tloušťek získané bezprostředně po uvolnění lisu a průměrné hodnoty tloušťek zhuštěného zkušební vzorku po replastifikaci posloužily k výpočtu parametru set-recovery zaznamenaného v následující tabulce Tab. 17. Bylo přistoupeno k výpočtu tohoto parametru na konci třech období. Ve dvou případech po uložení ve vodě, tedy v místech největších změn tloušťek materiálu a v místě, kdy byly vzorky vytaženy z prostředí exikátoru s relativní vlhkostí 68 %.

Tab. 17: Výsledná hodnota parametru set-recovery

Densifikace	SR [%]		
	1. uložení ve vodě	RH 68 %, Mg(NO ₃) ₂	2. uložení ve vodě
THM (1)	8,5	5,9	11,2
THM (2)	8,2	6,6	12,8
TM (1)	13,9	10,2	16,5
TM (2)	16,5	14,7	18,3

7.3. Adaptabilita procesu densifikace

7.3.1. Pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu

Výsledky pevnostně tuhostních parametrů (pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu) jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 18. Průměrné hodnoty jsou stanoveny z 9 zkušebních vzorků smrkové 7-vrstvé překližované desky pro každý typ úpravy.

Tab. 18: Průměrné hodnoty pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu smrkové překližované desky

Typ dřeviny	Typ tepelné úpravy	Směr	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti v ohybu [N/mm ²]	
			Průměrná hodnota f_m	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota E_m	Směrodatná odchylka
Smrková překližka	REF	FW II	35,3	2,1	9 200	500
		FW 1	29,4	5,2	5 600	100
		EW II	27,2	5,7	6 500	700
	DENS.	FW II	39,5	2,4	10 300	600
		FW 1	32,9	5,9	6 300	100
		EW II	32,1	6,7	7 700	800

8. Vyhodnocení a diskuse výsledků

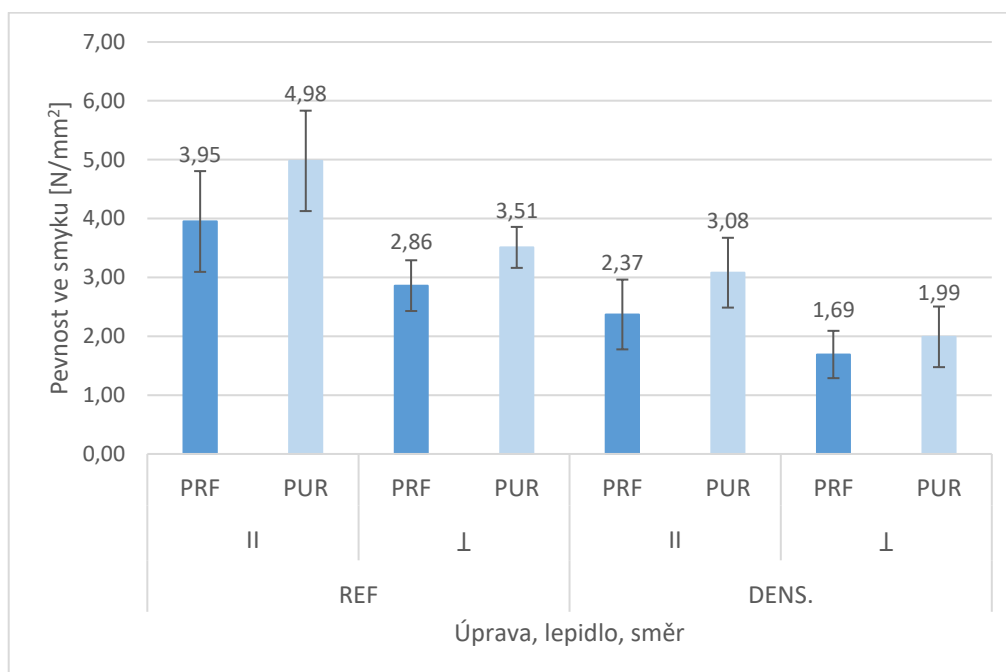
8.1. ETAPA 1 – Účinnost lepidel PRF a PUR pro lepení termicky ošetřeného překližovaného dřeva

V obou případech densifikace překližovaných desek (pro nános PRF i PUR lepidel) se podařilo dosáhnout velmi podobného zhuštění vyjádřeného kompresním poměrem. Pro březové překližované desky určené k lepení PRF lepidlem dosáhl kompresní poměr v průměru hodnoty 41,1 %. Větší míra zhuštění nastala u březových překližovaných desek určených k lepení pomocí PUR pryskyřic, což odpovídá hodnotě kompresního poměru 44,7 %.

8.1.1. Stanovení pevnosti ve smyku

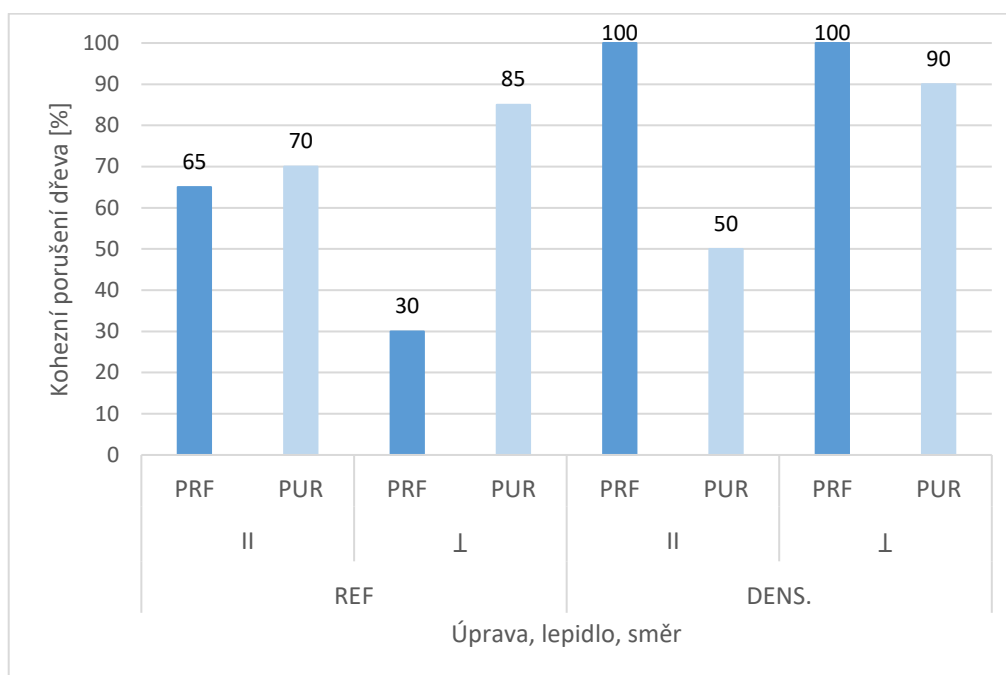
Na následujících grafech jsou znázorněny průměrné hodnoty smykových pevností březových překližovaných desek lepených PRF a PUR lepidly v závislosti na jednotlivých expozicích (označením REF jsou nazývány lepené nedensifikované zkušební vzorky).

Expozice I



Graf 4: Grafické znázornění pevnosti ve smyku březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, druhu lepidla a směru zkoušení po I. expozici

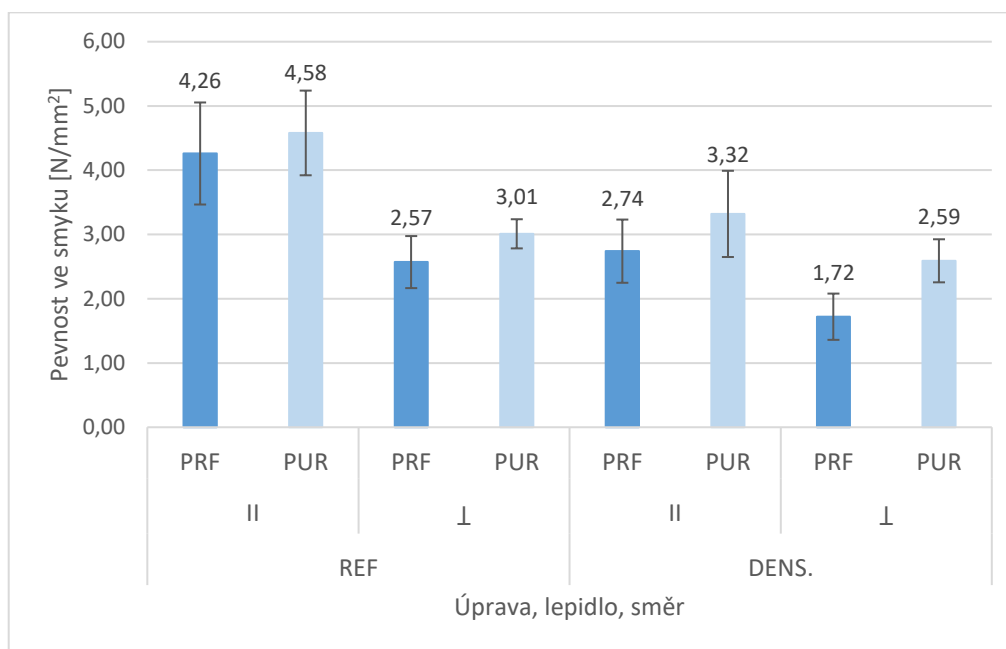
Při porovnání smykových pevností po 1. expozici je zřejmé, že vyšších hodnot dosahoval kompozitní materiál lepený PUR lepidlem. I přesto však došlo ke klesajícímu trendu výsledných pevností v obou densifikovaných případech lepených kompozitů oproti těmto vzorkům bez aplikace procesu densifikace (označené jako referenční). Nejvyšší pokles pevností (o 43 %) nastal vzhledem k referenčním hodnotám u densifikovaných vzorků s nánosem polyuretanového lepidla ve směru napříč vláken. Pro variantu s použitým PRF lepidlem klesly smykové pevnosti v průměru o 40 %.



Graf 5: Grafické znázornění kohezního porušení březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, lepidla a směru zkoušení po 1. expozici

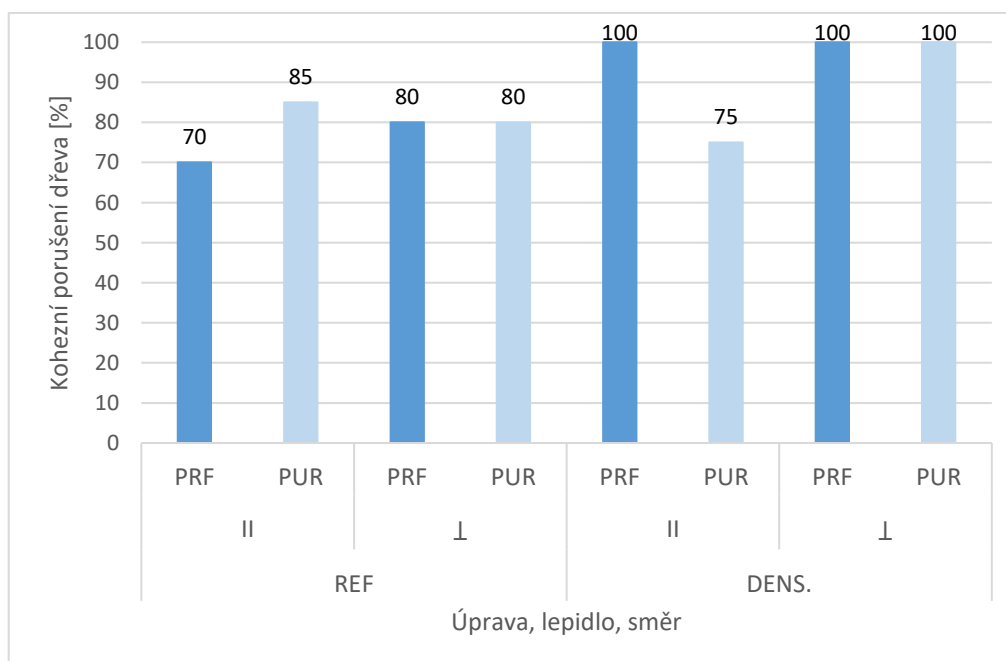
Graf 5 znázorňuje průměrné kohezní porušení v dřevní části vzorků. U densifikovaného systému březová překližka/PRF docházelo k vyššímu koheznímu porušení ve dřevě vzhledem ke svým referencím. Naopak hodnoty kohezního porušení v rámci zkušebních vzorků lepených PUR lepidlem jsou pro reference i densifikovanou úpravu velmi podobné ve směru napříč vláken. Ve směru podél vláken je patrný pokles porušení ze 70 na 50 %.

Expozice II



Graf 6: Grafické znázornění pevnosti ve smyku březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, druhu lepidla a směru zkoušení po 2. expozici

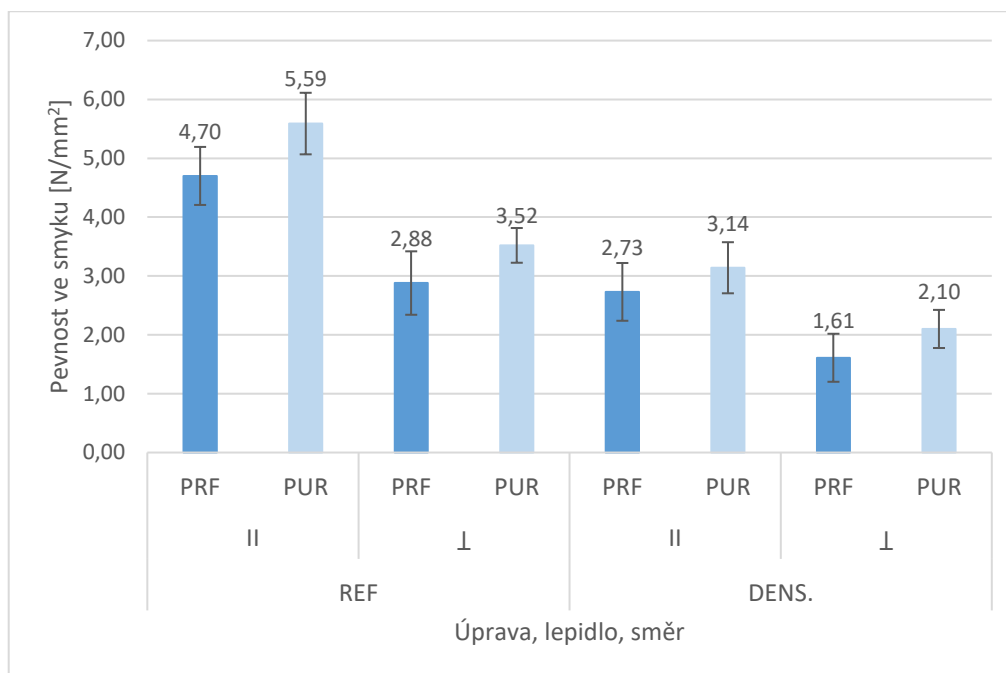
K největšímu poklesu pevností ve smyku došlo při aplikaci PRF lepidla ve směru napříč vlákny. Hodnoty densifikovaného kompozitu dosáhly na 64 % referenční pevnosti. Nejnižší pokles byl naopak zaznamenán u směru napříč vláken varianty PUR lepidla. Densifikované zkušební vzorky měly o 14 % nižší pevnosti ve smyku.



Graf 7: Grafické znázornění kohezního porušení březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, lepidla a směru zkoušení po 2. expozici

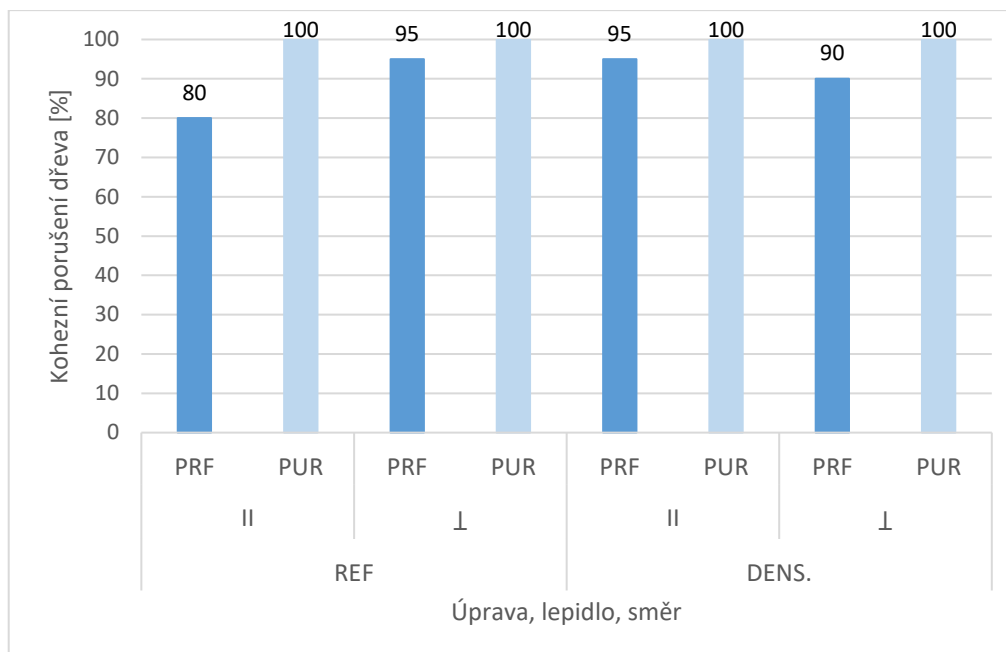
Celkově nejvyšších hodnot kohezního porušení dřeva bylo dosaženo u densifikovaných vzorků ve směru napříč vlákny lepených oběma typy lepidel a u densifikovaných vzorků ve směru podél vláken lepených PRF pryskyřicí. Ve zbylých případech se hodnoty porušení pohybovaly v rozmezí 80 %.

Expozice III



Graf 8: Grafické znázornění pevnosti ve smyku březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, druhu lepidla a směru zkoušení po 3. expozici

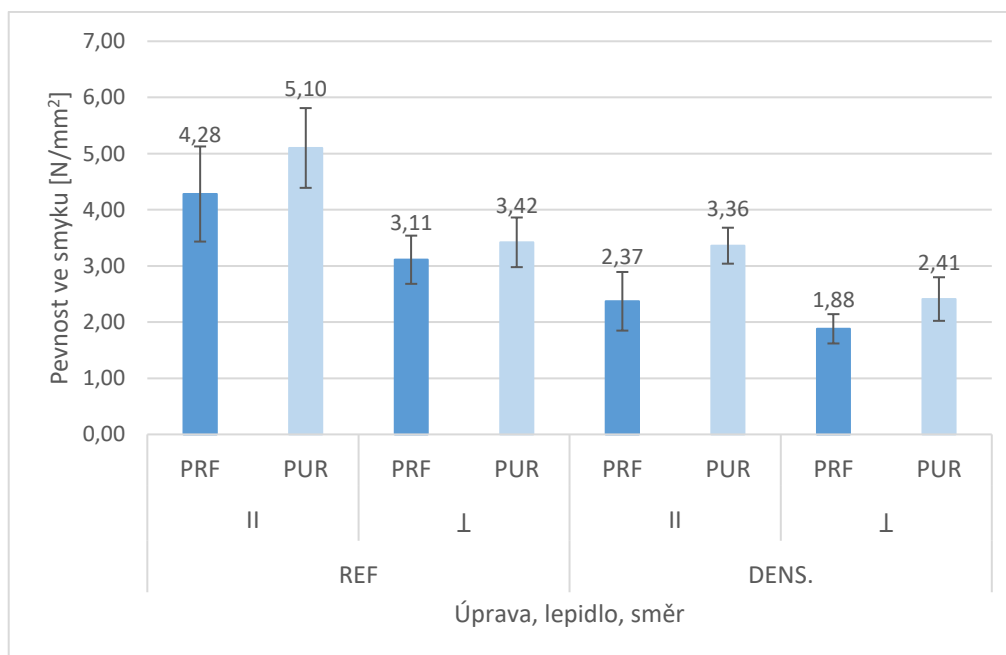
I v případě 3. expozice docházelo k výsledným poklesům pevností ve smyku. Největší rozdíl hodnot mezi referenční variantou a variantou s densifikovanými překližovanými deskami byl zaznamenán u dvou případů (březová překližka/PRF lepidlo ve směru napříč vlákny a březová překližka/PUR lepidlo pro podélný směr vláken). Smyková pevnost těchto zkušebních vzorků klesla shodně o 44 %.



Graf 9: Grafické znázornění kohezního porušení březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, lepidla a směru zkoušení po 3. expozici

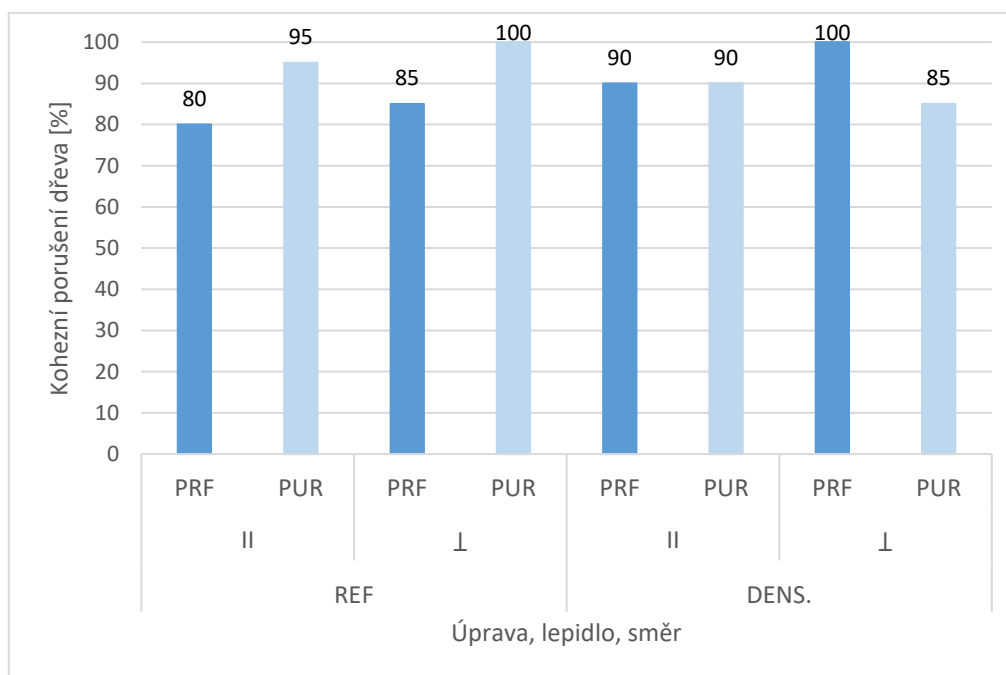
Hodnoty kohezního porušení densifikovaných zkušebních vzorků v aplikaci PUR lepidla se v porovnání s referenčními hodnotami nemění, zůstávají na 100 %. U vzorků březová překližka/PRF lepidlo došlo k porušení ve dřevní části v průměru kolem hodnoty 90 %.

Expozice IV



Graf 10: Grafické znázornění pevnosti ve smyku březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, druhu lepidla a směru zkoušení po 4. expozici

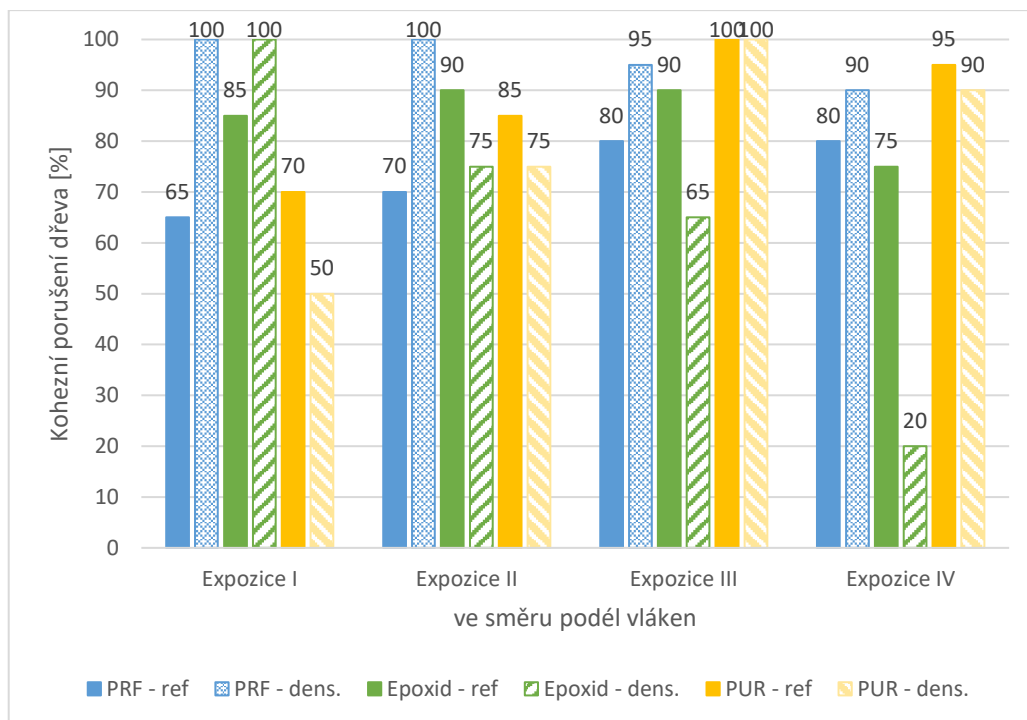
Pevnosti ve smyku klesaly i po účinku 4. expozice. Průměrně došlo k poklesu o 43 % pro variantu, kdy bylo v lepeném spoji použito PRF lepidlo. V případě aplikace PUR lepidla došlo k poklesům u densifikovaných vzorků o 32 %.



Graf 11: Grafické znázornění kohezního porušení březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, lepidla a směru zkoušení po 4. expozici

Kohezní porušení ve dřevní části se pohybovalo v rozmezí hodnot od 80 do 100 %. Dle Graf 11 je patrný nárůst kohezního porušení ve dřevě pro variantu PRF systému v densifikovaném stavu. PUR lepidlo je v případě této expozice horší, jelikož u tepelně upravených vzorků došlo ke snížení kohezního porušení oproti referencím.

Z výsledků je evidentní, že smyková pevnost kompozitu březová překližka/PUR lepidlo je ve všech případech vyšší než při aplikaci lepidla PRF. Pro srovnání kohezního porušení ve dřevě, pro jednotlivé druhy expozic a tepelné úpravy, vstupují do výsledků hodnoty kohezního porušení varianty kompozitního systému s aplikací epoxidového lepidla Biresin CR 82 (viz 7.1.3). Změny jsou patrné na následující grafických závislostech: Graf 12 udává kohezní porušení ve směru podél vláken, Graf 13 pak ve směru napříč vlákny.

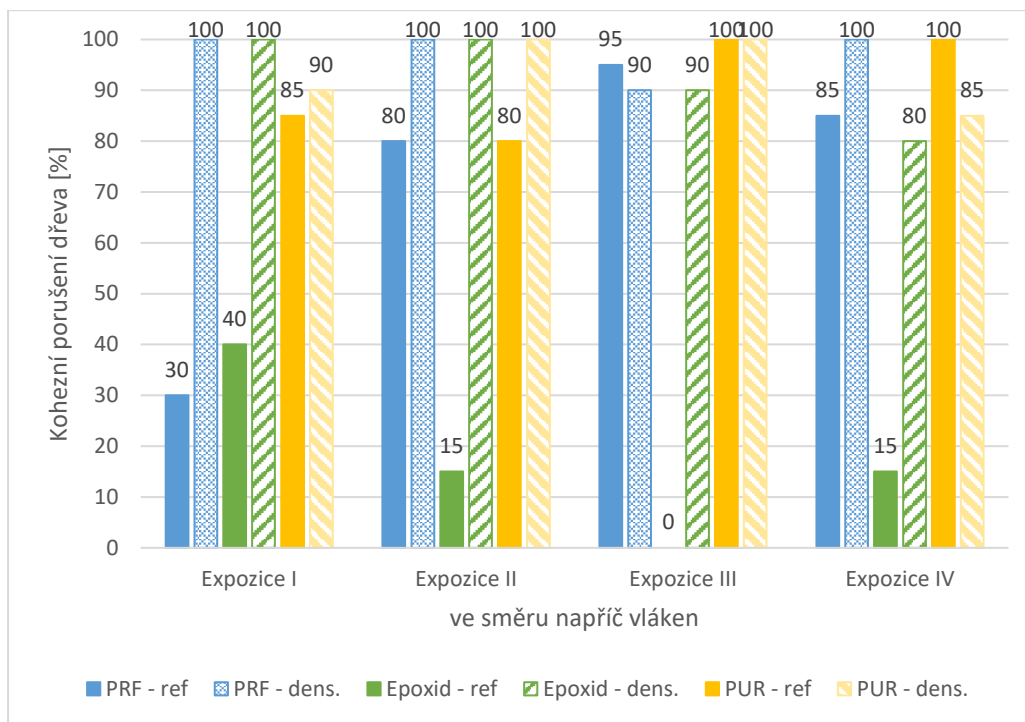


Graf 12: Grafické srovnání kohezního porušení systému březová překližka/lepidlo pro epoxidové, PUR a PRF lepidlo v závislosti na dané expozici a tepelné úpravě ve směru podél vláken

Ve směru podél vláken je (v případě použití PRF lepidla) viditelný nárůst kohezního porušení ve dřevní části u referenčních zkušebních (nedensifikovaných) vzorků po vystavení danými prostředími. Densifikované vzorky lepené PRF lepidly vykazovaly výrazně vyšších průměrných hodnot kohezního porušení oproti sadě vzorků, které densifikačním procesem neprošly (viz Graf 12 označení ref).

Tepelně upravené vzorky lepené epoxidovou pryskyřicí měly dle předpokladu klesající trend. Viditelné zhoršení kohezního porušení ve dřevě je patrné po účinku čtvrté expozice. Hodnota porušení byla v průměru 20 %.

Při aplikaci PUR lepidla v lepeném spoji došlo k nárůstu kohezního porušení u obou variant úprav zkušebních vzorků až na případ 4. expozice, zde byl pozorován mírný pokles. Průměrné hodnoty jsou pro referenční i densifikované vzorky srovnatelné.



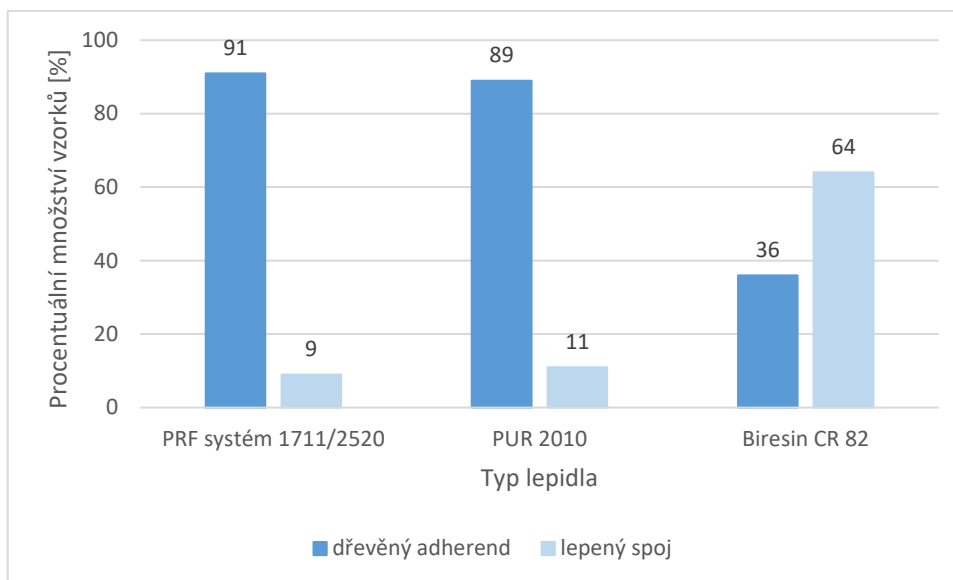
Graf 13: Grafické srovnání kohezního porušení systému březová překližka/lepidlo pro epoxidové, PUR a PRF lepidlo v závislosti na dané expozici a tepelné úpravě ve směru napříč vláken

Z grafické závislosti kohezního porušení ve směru napříč vláken je zřejmé, že nejhůře dopadly referenční vzorky lepené epoxidovým lepidlem. V případě třetí expozice měly vzorky 0% kohezní porušení. Srovnáme-li tepelně upravené vzorky lepené PRF i PUR lepidlem, lze konstatovat, že bylo dosaženo srovnatelných hodnot kohezního porušení pohybující se mezi hodnotou 90 až 100 %.

Výsledky byly porovnány se závěry studie [55], která hovoří o tom, že lepené spoje PRF lepidlem zpravidla fungují lépe než spoje s PUR lepidlem. Plyne to z podstaty, že nejslabší zónou v PUR lepených spojkách bývá adheze. Pokles výsledných smykových pevností zkušebních vzorků lepených PRF lepidlem je tak spíše přisuzováno vlastnostem dřeva, nikoliv samotnému lepidlu. Mimo jiné z výsledků vyplývá, že se epoxidová lepidla nehodí pro účely lepení dřevěných kompozitních materiálů, což se podařilo dokázat i vlastním experimentem. Výsledky vlastního experimentu mohl ovlivnit i fakt samotného stáří aplikovaných lepidel PRF a PUR.

8.1.2. Způsob porušení lepeného spoje

Následující grafické vyhodnocení vychází z procentuálního množství vzorků, u kterých byla vyhodnocena místa porušení po smykovém namáhání ve třech variantách lepidel (PRF 1711/2520, PUR 2010 a epoxidové lepidlo Biresin CR 82), které byly pro vytvoření lepeného spoje použity.



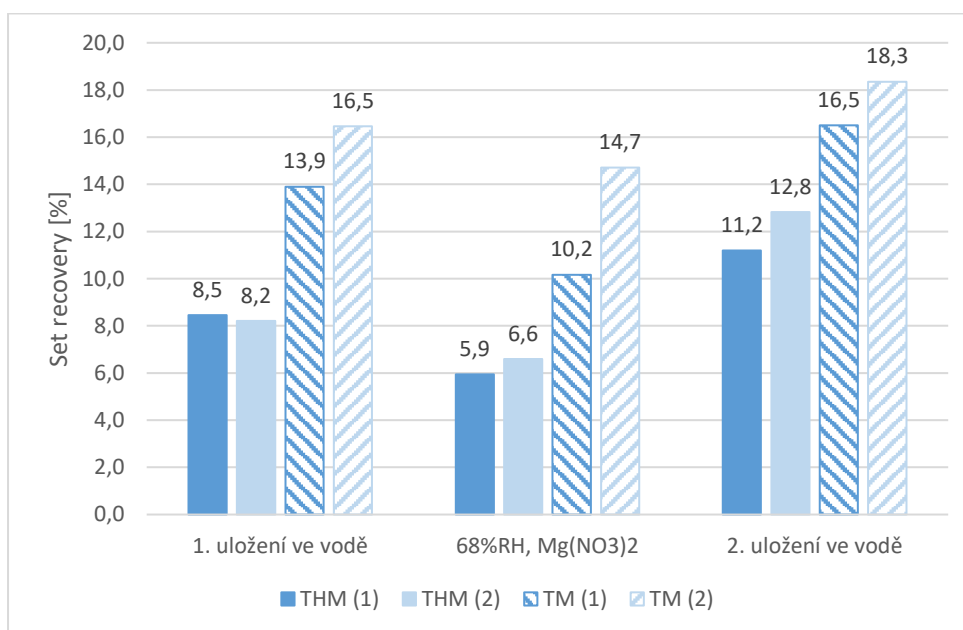
Graf 14: Grafické znázornění procentuálního porušení zkušebních vzorků v případě PRF, PUR a epoxidového lepidla (Biresin CR 82) použitých pro lepený spoj

Při jednotlivém porovnání místa porušení je zřejmé, že v případech lepidel PRF systémem 1711/2520 a PUR 2010 došlo k poškození v 91, respektive 89 % všech zkušebních vzorků ve dřevěném adherendu. Nejlépe se pak jeví použití PRF lepidla, které vykazovalo porušení v lepeném spoji pouze z 9 % počtu všech zkušebních vzorků. Zcela odlišný případ nastal při použití epoxidového lepidla od firmy Sika (Biresin CR 82). V tomto případě došlo u 64 % případů k porušení přímo v lepeném spoji. Tento jev lze očekávat již z povahy epoxidových lepidel. U těch v procesu vytvrzování dochází ke vzniku nadrozměrné struktury, která způsobí nabobtnání a prasknutí, čímž se výrazně sníží únosnost lepeného spoje.

8.2. ETAPA 2 – Účinnost densifikace proti set-recovery efektu při dlouhodobém cyklování

8.2.1. Set-recovery

Níže uvedený graf Graf 15 znázorňuje procentuální nárůst tloušťky zkušebních vzorků vystavených daným prostředím vzhledem k jejich tloušťce odebrané ihned po procesu densifikace.



Graf 15: Grafické znázornění parametru set-recovery pro obě typy densifikačních úprav lišících se stabilizací výsledného stavu pro 3 prostředí

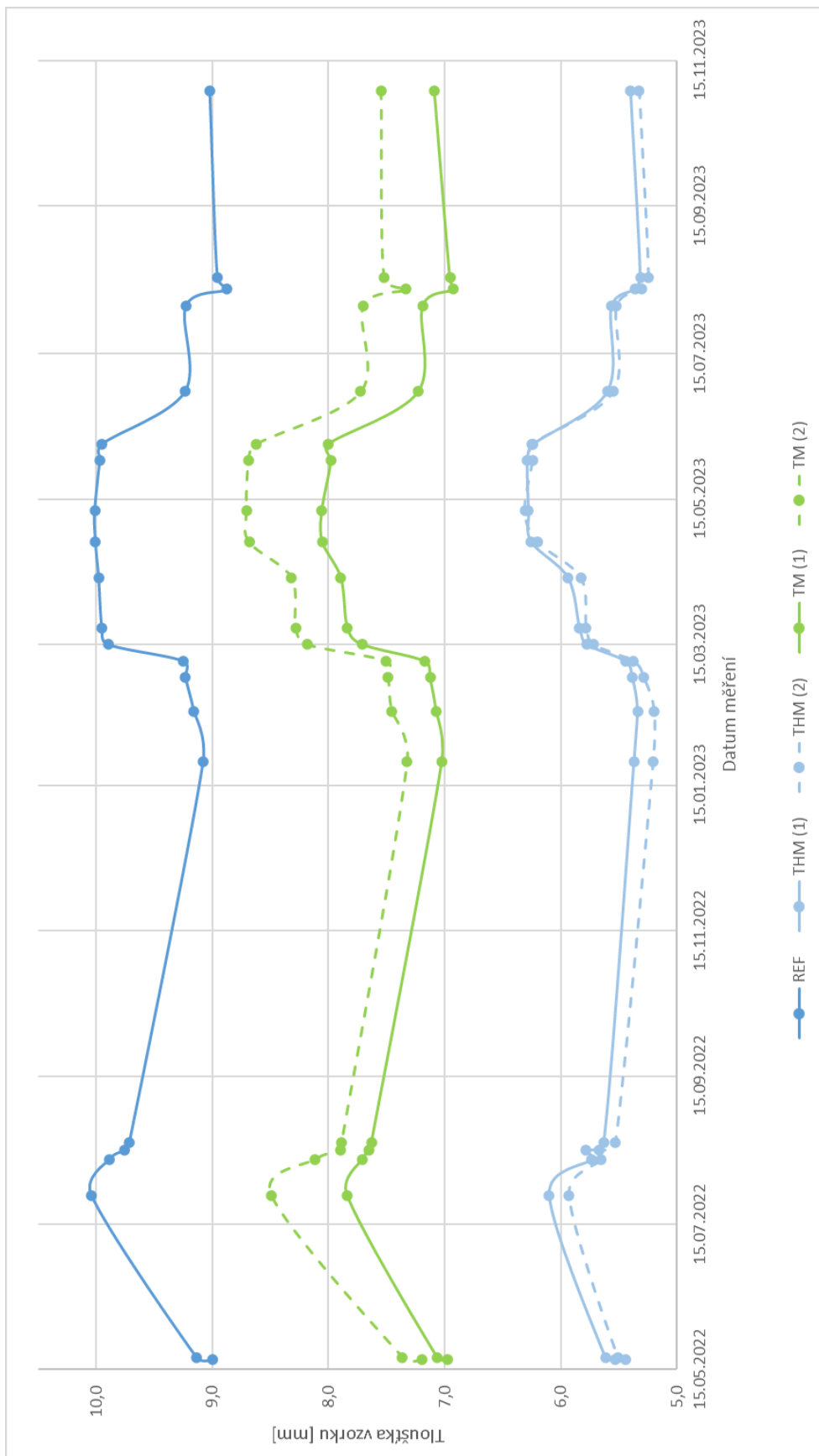
Výsledky z dlouhodobého cyklování odpověděly na otázku, zda a v jaké míře je plastifikovaná dřevěná buňka schopna, po vystavení účinkům daných prostředí, se zotavit do svých původních rozměrů (skrze uvolnění pružné deformace krystalické celulózy).

Největší míra zotavení nastala u zkušebních vzorků upravené **termickou densifikací**, jež byly následně po chlazení stabilizovány 16 hodin v lise pod zátěží. Naopak nižší míra schopnosti vrátit se do původního stavu nastala u termo-hydro-mechanické varianty. To vypovídá o tom, že **THM varianta je lepším metodou tepelné modifikace**, díky které docílíme stabilnější struktury výsledného materiálu. V případě, že byly vzorky z termické varianty úpravy vystaveny dlouhodobému uložení ve vodě, dosahovaly hodnoty set-recovery v průměru 15, resp. 17 %. I v prostředí exikátoru s relativní vlhkostí 68 % dosáhly vzorky TM vyšších hodnot navlhání po replastifikaci původního tvaru. Vzorky

upravené hydrotermickou úpravou mají obecně nižší snahu navlhat do původních rozměrů, což je z hlediska aplikací výsledných materiálů žádoucí. V prostředí exikátoru s relativní vlhkostí 68 % se u vzorků THM pohyboval parametr set-recovery okolo 6,3 %.

Výsledky tohoto experimentu jsou velmi podobné s výsledky dosaženými v zahraničí [56; 57; 58]. Rozměrové změny jsou výhradně způsobeny bobtnáním a smršťováním zkušebních vzorků mezi vlhkým a suchým prostředím. V úvahu je potřeba brát i chování dřeva při hysterezi a snížení jeho hygroskopičnosti po opakovaných vlhkostních cyklech. **K téměř úplné fixaci** by podle mnoha zdrojů mohlo dojít **napařováním stlačeného dřeva** po dobu 1 minuty při 200 °C nebo 8 minut při 180 °C [59]. Výsledek zotavení ovlivňuje také použití různých lisovacích tlaků. Jelikož toho v práci využito nebylo, mohlo by se to stát předmětem dalších výzkumů společně s vyhodnocením změn v jednotlivých cyklech pomocí světelné mikroskopie.

Graf 16 uvedený na následující straně přehledně znázorňuje celé 18měsíční cyklování, během kterých byly zkušební vzorky z březových překližovaných desek pro oba typy úprav (THM i TM, společně s referencí) vystavovány v již zmíněných prostředích (viz 7.2). Během této doby se podařilo provést cíleně celkem 2 cykly (charakteristické píky v nárůstech tlouštěk zkušebních vzorků). První výrazný pík byl zaznamenán po 2 měsících. V této době vzorky dosáhly po uložení ve vodě maximální hodnoty bobtnání. Dále byly dlouhodobě ponechány v laboratorních podmínkách, aby došlo přirozeným vysušováním k jejich ustálení. Po této době docházelo k ukládání vzorků do prostředí exikátorů se zvýšenou relativní vlhkostí (71 a 68 %). Toto prostředí nejvíce ovlivnilo vzorky z termické úpravy TM (2), u kterých došlo k nárůstu hodnot tlouštěk o 3,3 % oproti stavu vystavení laboratorních podmínek. Naopak nejméně toto prostředí ovlivnilo vzorky THM (1), kde byl nárůst pouze o 1,4 %. Pro další stanovení nasákavosti byly vzorky znovu uloženy do prostředí vody v laboratorních podmínkách. Tato expozice byla ukončena v horizontu 2 měsíců, při kterých bylo dosaženo maximální nasákavosti. Ve všech případech došlo k nárůstu v průměru o 13,2 % oproti stavu v předchozí expozici. Následovala doba, kdy byly vzorky ponechány v laboratorních podmínkách a poté vysušovány v sušárně za účelem ukončit proces cyklování při dosažení stejné vlhkosti ve zkušebních vzorcích jako na počátku měření.

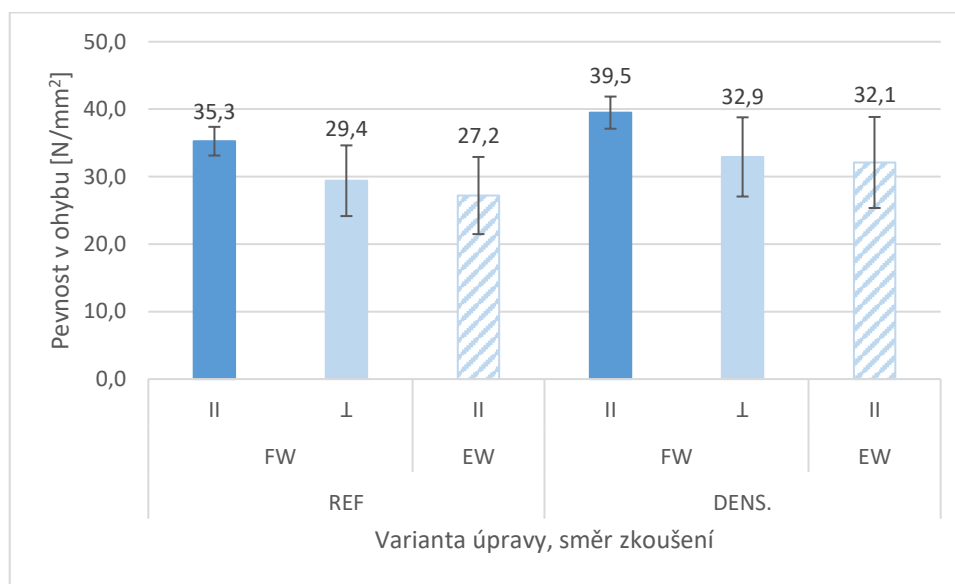


Graf 16: Grafické znázornění průměrné změny tloušťky v závislosti na druhu úpravy

8.3. ETAPA 3 – Ověření adaptability procesu densifikace

8.3.1. Pevnost v ohybu

Zkouška pevnosti v ohybu probíhala 4-bodovým ohybem a její vyhodnocení je na příslušném grafu. Znázorněny jsou průměrné hodnoty těchto pevností pro smrkové překližované desky zkoušené při laboratorních podmínkách.

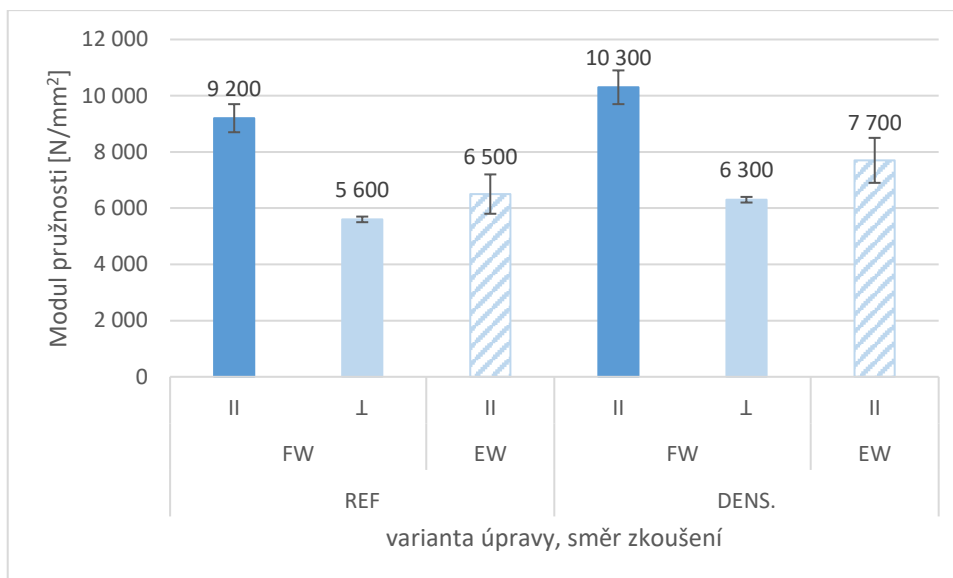


Graf 17: Grafické znázornění pevnosti v ohybu smrkové překližované desky v závislosti na variantě termické úpravy

Z výsledků je patrné, že se prokázal pozitivní vliv densifikační úpravy vzorků ze smrkové překližované desky. Díky této úpravě nedošlo k žádným výrazným delaminacím oproti dřevu břízy. Ve všech případech došlo vůči referenčním hodnotám k navýšení ohybových pevností. V průměru o 12 % pro zatěžování ve směru flatwise (kolmo na povrch dýh), respektive o 18 % pro směr edgewise, během kterého docházelo k mechanickému zatěžování kolmo na hranu dýhy.

8.3.2. Modul pružnosti v ohybu

Současně se při zkoušce pevnosti v ohybu stanovovaly i průměrné hodnoty modulu pružnosti densifikovaných zkušebních vzorků ze smrkové překližované desky. Grafické vyjádření těchto výsledků je uvedeno na následujícím grafu Graf 18.



Graf 18: Grafické znázornění modulu pružnosti v ohybu smrkové překližované desky v závislosti na variantě termické úpravy

Výsledky ukazují, že densifikační úprava měla pozitivní vliv nejen na pevnostní charakter smrkové překližované desky, ale i na tuhostní. Globální moduly pružnosti v ohybu densifikovaných materiálů dosáhly vyšších hodnot oproti hodnotám referencí (nedensifikovaných vzorků). Dle očekávání hodnoty vycházely vyšší ve směru podél vláken než ve směru napříč vláken překližované smrkové desky. Lze očekávat, že tento jev nastal díky plastifikaci deskového materiálu v prostředí relativní vlhkosti 90 % a teploty 30 °C.

Při porovnání výsledných ohybových pevností a modulu pružnosti u referenčních a densifikovaných zkušebních těles ze smrkové překližované desky je zjevné, že **densifikační úpravou je možné dosáhnout vyšších hodnot pevností a tuhostí**. Tento jev byl na základě obecného předpokladu očekáván. Zvolené technologické parametry se ukázaly jako úspěšné i při využití na smrkovém překližovaném sortimentu, ve kterém nedošlo k žádné výrazné delaminaci. Výsledky byly porovnány se studií [60], ve které autor využil proces napařování smrkových dých spojeným močovinoformaldehydovou pryskyřicí. Autor z výsledků vyvodil, že vliv procesu napařování je na pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu významný. Účinek procesu napařování však může být různý v závislosti na druhu dřeva. Naopak vyšších výsledků bylo dosaženo ve studii [61], která využívala materiál z vrstvených dých dřeva cypríše-borovice lepených močovinoformaldehydovou pryskyřicí. Autoři v ní experimentovali s umístěním dých s vyššími výkonnostními vlastnostmi směrem k vnějším vrstvám.

9. Závěr

Hlavní náplní této diplomové práce bylo posouzení vlivu různých typů lepidel při aplikaci v lepeném spoji kompozitního systému založeném na březové překližované desce, která byla dále podrobena tepelnému zpracování, metodou zvanou densifikace. Porovnání účinnosti těchto zvolených lepidel proběhlo v závislosti na pevnostních parametrech tohoto lepeného kompozitu. Dále byla ověřována kvalita použité densifikační úpravy proti efektu set-recovery. V poslední etapě byla experimentálně ověřována možnost aplikace densifikačního procesu (s nastavenými dílčími parametry) na jiný dřevěný překližovaný sortiment (byla vybrána smrková překližovaná deska).

V teoretické části byla provedena rozsáhlá rešerše vědeckých studií zabývajících se problematikou termické odolnosti lepidel určených pro lepení nosných dřevěných konstrukcí. Z těchto poznatků vyplývá, že nejlépe hodnocenými lepidly jsou lepidla polyuretanová a fenol-resorcín-formaldehydová, která odolávají i teplotách kolem 200 °C a nezpůsobují tak výrazný pokles pevnostních parametrů jako v případech dřevěných prvků lepených močovinoformaldehydovými pryskyřicemi.

V rámci experimentálních prací byly vytvořeny série vzorků, tvořené lepenými březovými překližovanými deskami v surovém a densifikačním stavu, lepidly fenol-resorcín-formaldehydovým (PRF) 1711/2520 a polyuretanovým (PUR) 2010. Na takto vyrobených vzorcích byly stanoveny pevnosti ve smyku a hodnoty kohezního porušení ve dřevě. Při stanovení smykových pevností bylo vyšších hodnot dosaženo u referenčních vzorků lepených PUR lepidlem oproti takto lepeným vzorkům po tepelné úpravě ve všech čtyřech testovaných expozicích. Pokles oproti referenci vykazovaly i densifikované vzorky spojené PRF adhesivem. Ve směru podél i napříč vláken vykazovaly pevnosti kompozitu densifikovaná březová překližka/PRF pokles v průměru o 40 %, zatímco pro případ s PUR pryskyřicí byl pokles oproti referenci nižší: ve směru podél vláken o 36 %, resp. napříč vlákeny o 30 %. Do výsledků byly zohledněny i poznatky předchozí studie [54], u kterých došlo ve směru podél vláken k poklesu smykové pevnosti kompozitu densifikovaná březová překližka/epoxid v průměru o 36 %. Z výsledků kohezního porušení všech posuzovaných lepidel pak plyne závěr, že epoxidová lepidla v porovnání s PRF a PUR nejsou vhodná pro lepení překližovaného sortimentu (bez a s termickou modifikací). Jako optimální lepidlo s dobrou odolností proti objemovým změnám se jevílo použití lepidla PRF.

Vlivem působení účinků prostředí se zvýšenou vlhkostí se podařilo experimentálně prokázat, že z hlediska termické (TM) a hydrotermické úpravy (THM) je náchylnější na změny prostředí TM modifikace. U této úpravy došlo v průběhu cyklování po dobu 1,5 roku k procesu zotavení buněk, tj. k opětovnému vrácení o 17 %. Naopak hydrotermická metoda je v kontextu těchto výsledků hodnocena jako optimální varianta tepelné úpravy pro zajištění nižší míry navlhání po replastifikaci.

Bylo prokázáno, že proces densifikace je možné aplikovat i v případě jiných dřevěných adherendů, což dokazuje pozitivní vliv této tepelné úpravy nejen na výsledky pevností v ohybu a modulu pružnosti pro smrkové překližované desky, ale výsledky navíc neprokázaly žádné výrazné znaky delaminace po provedené tepelné modifikaci.

Z výše uvedených závěrů lze konstatovat, že hlavní cíle diplomové práce byly naplněny. Předmětem dalšího zkoumání s ohledem na dosažené výsledky navrhuji provést sledování vlivu čedičové BFRP tkaniny aplikované v lepeném spoji vyvíjeného densifikovaného kompozitu. Přítomnost takto zesíleného spoje by mohla vykázat pozitivní efekt zvýšení únosnosti a trvanlivosti lepené spáry u tepelně modifikovaného sortimentu.

Seznam použité literatury

- [1] LIU, Jian; YUE, Kong; XU, Liqin; WU, Jinhao; CHEN, Zhangjing et al. Bonding performance of melamine-urea-formaldehyde and phenol-resorcinol-formaldehyde adhesive glulams at elevated temperatures. online. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020, roč. 98, s. 1-7. ISSN 01437496. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102500>. [cit. 2024-01-03].
- [2] VANĚREK, J.; BÁLKOVÁ, R.; ŠMAK, M.; BĚŤÁK, A. a VEJPUSTEK, Z. The effect of long and short term elevated temperatures on the behaviour of lap glued joints of load-bearing spruce elements. online. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2024, roč. 129, s. 1-10. ISSN 01437496. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103575>. [cit. 2024-01-03].
- [3] DAGBRO, Ola. *Studies on Industrial-Scale Thermal Modification of Wood*. Doctoral Thesis. Skellefteå, Sweden: Luleå University of Technology, Department of Engineering Sciences and Mathematics, 2016.
- [4] online. In: TimberLine. Ashland: Timberline Magazine, c2010-2023. Dostupné z: <https://timberlinemag.com/2021/08/thermal-modification-benefits-wood/>. [cit. 2023-03-16].
- [5] AYTIN, Ayhan; UYGUR, İlyas; DEMIRCI, Tuna a AKGÜL, İrfan. The effect of cryogenic treatment on some chemical, physical, and mechanical properties of ThermoWood® Oriental spruce. *BioResources*. 2022, roč. 17, č. 4, s. 6983-6996. ISSN 19302126. Dostupné z: <https://doi.org/10.15376/biores.17.4.6983-6996>.
- [6] online. In: Thermory. Tallinn, 2023. Dostupné z: <https://thermory.com/thermal-modification/>. [cit. 2023-03-16].
- [7] TORNIAINEN, Petteri; JONES, Dennis a SANDBERG, Dick. Colour as a quality indicator for industrially manufactured ThermoWood®. *Wood Material Science & Engineering*. 2021, roč. 16, č. 4, s. 287-289. ISSN 1748-0272. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1958920>.

- [8] YOUNSI, R.; KOCAEFE, D.; PONCSAK, S. a KOCAEFE, Y. Computational and experimental analysis of high temperature thermal treatment of wood based on ThermoWood technology. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2010, roč. 37, č. 1, s. 21-28. ISSN 07351933. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.08.008>.
- [9] LABAT, Gilles; BUCKET, Emmanuel; LEGAY, Stéphane; YRIEX, Christophe; MARCHAL, Philippe et al. Environmental characterisation of retification process by-products (liquid and gaseous wastes). *THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION*. 2005, roč. 05, č. 50, s. 11-12.
- [10] JEBRANE, Mohamed; POCKRANDT, Michael; CUCCUI, Ignazia; ALLEGRETTI, Ottaviano; UETIMANE, Ernesto et al. Comparative Study of Two Softwood Species Industrially Modified by Thermowood® and Thermo-Vacuum Process. online. *BioResources*. 2017, roč. 13, č. 1, s. 715-728. ISSN 19302126. Dostupné z: <https://doi.org/10.15376/biores.13.1.715-728>. [cit. 2024-01-01].
- [11] JEBRANE, Mohamed; CUCCUI, Ignazia; ALLEGRETTI, Ottaviano; JUNIOR, Ernesto a TERZIEV, Nasko. Thermowood ® vs Termovuoto process-comparison of thermally modified timber in industrial conditions. online. *European Conference on Wood Modification*. 2018, s. 1-2. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/327905181_Thermowood_R_vs_Termovuoto_process-comparison_of_thermally_modified_timber_in_industrial_conditions. [cit. 2024-01-01].
- [12] MA'RUF, Shalehudin; BAKRI, Samsul; FEBRYANO, Indra; SETIAWAN, Agus; HARYANTO, Agus et al. Effects of Temperature during Oil Heat Treatment on the Quality Improvement of Mindi (*Melia azedarach*) and Sengon (*Falcataria moluccana*) Woods. online. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*. 2023, roč. 12, č. 1, s. 255-267. ISSN 2549-0818. Dostupné z: <https://doi.org/10.23960/jtep-1.v12i1.255-267>. [cit. 2024-01-02].

- [13] SURI, Intan; PURUSATAMA, Byantara; LEE, Seung; KIM, Nam; HIDAYAT, Wahyu et al. CHARACTERISTIC FEATURES OF THE OIL-HEAT TREATED WOODS FROM TROPICAL FAST GROWING WOOD SPECIES. online. *Wood Research*. 2021, roč. 66, č. 3, s. 365-378. ISSN 1336-4561. Dostupné z: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/66.3.365378>. [cit. 2024-01-02].
- [14] NEYSES, Benedikt. *Surface Densification of Solid Wood: Paving the Way Towards Industrial Implementation*. Disertace. Luleå: University of Technology, 2019. ISBN 978-91-7790-436-6.
- [15] BURIÁNEK, Vlastimil. *Inovativní materiály na bázi dřeva*. Bakalářská práce, vedoucí doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2022.
- [16] DAGBRO, Ola; TORNIAINEN, Petteri; KARLSSON, Olov a MORÉN, Tom. Colour responses from wood, thermally modified in superheated steam and pressurized steam atmospheres. online. *Wood Material Science and Engineering*. 2010, roč. 5, č. 3-4, s. 211-219. ISSN 1748-0272. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17480272.2010.520739>. [cit. 2024-01-03].
- [17] ESTEVES, Bruno; VELEZ MARQUES, António; DOMINGOS, Idalina a PEREIRA, Helena. Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. online. *Wood Science and Technology*. 2008, roč. 42, č. 5, s. 369-384. ISSN 0043-7719. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0157-2>. [cit. 2024-01-03].
- [18] NUOPPONEN, Mari; VUORINEN, Tapani; JÄMSÄ, Saila a VIITANIEMI, Pertti. Thermal Modifications in Softwood Studied by FT-IR and UV Resonance Raman Spectroscopies. online. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2005, roč. 24, č. 1, s. 13-26. ISSN 0277-3813. Dostupné z: <https://doi.org/10.1081/WCT-120035941>. [cit. 2024-01-03].

- [19] BHUIYAN, Tariqur a HIRAI, Nobuyuki. Study of crystalline behavior of heat-treated wood cellulose during treatments in water. online. *Journal of Wood Science*. 2005, roč. 51, č. 1, s. 42-47. ISSN 1435-0211. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0615-x>. [cit. 2024-01-03].
- [20] TORNIAINEN, P.; DAGBRO, O. a MORÉN, T. Thermal modification of birch using saturated and superheated steam. In: *Proceedings of the 7th meeting of the Nordic-Baltic Network in Wood Material Science and Engineering*. 2011, s. 43-48. ISSN 1891-7933.
- [21] HE, Luxi; ZHANG, Tianfang; ZHAO, Yuxin; GAO, Jingjing; ZHANG, Yihao et al. Effect of natural tung oil on wood shrinkage during the thermal modification process. online. *Journal of Cleaner Production*. 2022, roč. 379, s. 1-5. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134450>. [cit. 2023-11-03].
- [22] BEKHTA, Pavlo; SALCA, Emilia-Adela a LUNGULEASA, Aurel. Some properties of plywood panels manufactured from combinations of thermally densified and non-densified veneers of different thicknesses in one structure. online. *Journal of Building Engineering*. 2020, roč. 29. ISSN 23527102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101116>. [cit. 2023-07-29].
- [23] ARRUDA, Larissa a DEL MENEZZI, Cláudio. Properties of a Laminated Wood Composite Produced with Thermomechanically Treated Veneers. online. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016, roč. 2016, s. 1-9. ISSN 1687-8434. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2016/8458065>. [cit. 2023-07-30].
- [24] KUAI, Bingbin; XU, Qin; ZHAN, Tianyi; LV, Jianxiong; CAI, Liping et al. Development of super dimensional stable poplar structure with fire and mildew resistance by delignification/densification of wood with highly aligned cellulose molecules. online. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024, roč. 257, s. 1-10. ISSN 01418130. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128572>. [cit. 2024-01-03].

- [25] FREY, Marion; WIDNER, Daniel; SEGMEHL, Jana; CASDORFF, Kirstin; KEPLINGER, Tobias et al. Delignified and Densified Cellulose Bulk Materials with Excellent Tensile Properties for Sustainable Engineering. online. 2018, roč. 10, č. 5, s. 5030-5037. ISSN 1944-8244. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b18646>. [cit. 2024-01-03].
- [26] MANIA, Przemysław; WRÓBLEWSKI, Miłosz; WÓJCIAK, Adam; ROSZYK, Edward a MOLIŃSKI, Waldemar. Hardness of Densified Wood in Relation to Changed Chemical Composition. online. *Forests*. 2020, roč. 11, č. 5. ISSN 1999-4907. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/f11050506>. [cit. 2024-01-03].
- [27] BEKHTA, Pavlo; PIPÍŠKA, Tomáš; GRYC, Vladimír; SEDLIAČIK, Ján; KRÁL, Pavel et al. Properties of Plywood Panels Composed of Thermally Densified and Non-Densified Alder and Birch Veneers. online. *Forests*. 2023, roč. 14, č. 1, s. 1-18. ISSN 1999-4907. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/f14010096>. [cit. 2023-05-22].
- [28] HUANG, Dafang; WU, Jiayang; CHEN, Chaoji; FU, Xinxin; BROZENA, Alexandra et al. Precision Imprinted Nanostructural Wood. online. *Advanced Materials*. 2019, roč. 31, č. 48, s. 1-7. ISSN 0935-9648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/adma.201903270>. [cit. 2024-01-03].
- [29] TZE, W.T.Y.; WANG, S.; RIALS, T.G.; PHARR, G.M. a KELLEY, S.S. Nanoindentation of wood cell walls: Continuous stiffness and hardness measurements. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007, roč. 38, č. 3, s. 945-953. ISSN 1359835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.06.018>. [cit. 2023-11-20].
- [30] HUANG, Yuxiang; LIN, Qiuqin; FU, Feng; LIN, Lanying a YU, Wenji. Scalable high-performance wood-based composites prepared by hydro-mechanical treatment. online. *Composites Part B: Engineering*. 2023, roč. 267, s. 2. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111041>. [cit. 2024-01-04].

- [31] OBERSRIEBNIG, Michael; KONNERTH, Johannes a GINDL-ALTMUTTER, Wolfgang. Evaluating fundamental position-dependent differences in wood cell wall adhesion using nanoindentation. online. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2013, roč. 40, s. 129-134. ISSN 01437496. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.08.011>. [cit. 2023-11-18].
- [32] BEKHTA, Pavlo; PROSZYK, Stanisław; KRYSZTOFIK, Tomasz; SEDLIACIK, Jan; NOVAK, Igor et al. Effects of short-term thermomechanical densification on the structure and properties of wood veneers. *Wood Material Science & Engineering*. 2015, roč. 12, č. 1, s. 40-54. ISSN 1748-0272. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17480272.2015.1009488>.
- [33] BEKHTA, Pavlo; NIEMZ, Peter a SEDLIACIK, Jan. Effect of pre-pressing of veneer on the glueability and properties of veneer-based products. online. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2012, roč. 70, č. 1-3, s. 99-106. ISSN 0018-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0486-y>. [cit. 2023-12-30].
- [34] BEKHTA, Pavlo; HIZIROGLU, Salim a SHEPELYUK, Oleg. Properties of plywood manufactured from compressed veneer as building material. online. 2009, roč. 30, č. 4, s. 947-953. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.001>. [cit. 2023-12-30].
- [35] HU, P.; HAN, X.; LI, W.D.; LI, L. a SHAO, Q. Research on the static strength performance of adhesive single lap joints subjected to extreme temperature environment for automotive industry. online. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2013, roč. 41, s. 119-126. ISSN 01437496. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.10.010>. [cit. 2023-10-04].
- [36] ZHOU, Jun; YUE, Kong; LU, Weidong; CHEN, Zhangjing; CHENG, Xiucai et al. Bonding performance of melamine-urea-formaldehyde and phenol-resorcinol-formaldehyde adhesives in interior grade glulam. online. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2017, roč. 31, č. 23, s. 2630-2639. ISSN 0169-4243. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1313185>. [cit. 2023-10-04].

- [37] CLAUß, Sebastian; JOSCAK, Matus a NIEMZ, Peter. Thermal stability of glued wood joints measured by shear tests. online. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2011, roč. 69, č. 1, s. 101-111. ISSN 0018-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0411-4>. [cit. 2024-01-01].
- [38] ROSLI, Muhammad; BHKARI, Norshariza; ZUKI, Muhammad; CHEN, Lum; AZMI, Anis et al. Manufacturing Study on Different Glue Spread and Press Pressure for Glued Laminated Timber Made from Laran. online. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*. 2023, roč. 107, č. 1, s. 20-29. ISSN 22897895. Dostupné z: <https://doi.org/10.37934/aram.107.1.2029>. [cit. 2024-01-04].
- [39] SASTRI, Vinny R. *Plastics in Medical Devices: Properties, Requirements, and Applications*. 3rd edition. Plastics Design Library, 2022. ISBN 978-0-323-85126-8.
- [40] VIDHOLDOVÁ, Zuzana; CIGLIAN, Dávid a REINPRECHT, Ladislav. Bonding of the thermally modified norway spruce wood with the PUR and PVAc adhesives. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen: vedecký časopis Drevárskej fakulty*. 2021, roč. 63, č. 1, s. 63-73. ISSN 1336-3824.
- [41] FRANGI, Andrea; FONTANA, Mario a MISCHLER, Adrian. Shear behaviour of bond lines in glued laminated timber beams at high temperatures. online. *Wood Science and Technology*. 2004, roč. 38, č. 2, s. 119-126. ISSN 0043-7719. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00226-004-0223-y>. [cit. 2023-09-02].
- [42] BORGES, Catarina; JALALI, Shahin; TSOKANAS, Panayiotis; MARQUES, Eduardo; CARBAS, Ricardo et al. Sustainable Development Approaches through Wooden Adhesive Joints Design. online. *Polymers*. 2023, roč. 15, č. 1. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym15010089>. [cit. 2023-08-28].
- [43] PIZZI, A. Recent developments in eco-efficient bio-based adhesives for wood bonding: opportunities and issues. online. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2006, roč. 20, č. 8, s. 829-846. ISSN 0169-4243. Dostupné z: <https://doi.org/10.1163/156856106777638635>. [cit. 2024-01-04].

- [44] BACIGALUPE, Alejandro; FERNÁNDEZ SOLARTE, Alejandra; FERNÁNDEZ, Mariela; TORRES SÁNCHEZ, Rosa; EISENBERG, Patricia et al. Bio-adhesives from soy protein concentrate and montmorillonite: Rheological and thermal behaviour. online. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2017, roč. 77, s. 35-40. ISSN 01437496. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.03.018>. [cit. 2024-01-07].
- [45] JASIŪNAS, Lukas; PECK, Gabrielle; BRIDŽIUVIENĖ, Danguolė a MIKNIUS, Linas. Mechanical, thermal properties and stability of high renewable content liquefied residual biomass derived bio-polyurethane wood adhesives. online. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020, roč. 101. ISSN 01437496. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102618>. [cit. 2024-01-08].
- [46] AKZONOBEL, . *PRF liimajärjestelmä 1711/2520 liimapuupalkkien valmistukseen: Tuoteseloste*. Online. 3. 2018.
- [47] SASTRI, Vinny R. Three-Dimensional Printing, Wearables, Medical Textiles, Adhesives, and Coatings. online. *Plastics in Medical Devices*. 2022, s. 381-421. ISBN 9780323851268. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85126-8.00004-7>. [cit. 2023-12-03].
- [48] AKZONOBEL, . *PUR ADHESIVE 2010*. Online. 2022.
- [49] ČSN EN 314-1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [50] ČSN EN 317. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1995.
- [51] ČSN EN ISO 12571. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- [52] CABRAL, John; KAFLE, Bidur; SUBHANI, Mahbube; REINER, Johannes a ASHRAF, Mahmud. Densification of timber: a review on the process, material properties, and application. *Journal of Wood Science*. 2022, roč. 68, č. 1, s. 1-24. ISSN 1435-0211. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02028-3>.

- [53] ČSN EN 408+A1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [54] ZMĚLÍK, Jiří. *Vývoj zesíleného kompozitního materiálu s využitím modifikovaných deskových materiálů na bázi dřeva*. Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2023.
- [55] AMMANN, Samuel a NIEMZ, Peter. Mixed-mode fracture toughness of bond lines of PRF and PUR adhesives in European beech wood. online. *Holzforschung*. 2015, roč. 69, č. 4, s. 415-420. ISSN 1437-434X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0096>. [cit. 2024-01-11].
- [56] RAUTKARI, Lauri; PROPERZI, Milena; PICHELIN, Frédéric a HUGHES, Mark. Properties and set-recovery of surface densified Norway spruce and European beech. online. *Wood Science and Technology*. 2010, roč. 44, č. 4, s. 679-691. ISSN 0043-7719. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00226-009-0291-0>. [cit. 2024-01-11].
- [57] KUTNAR, Andreja a KAMKE, Frederick. Influence of temperature and steam environment on set recovery of compressive deformation of wood. online. *Wood Science and Technology*. 2012, roč. 46, č. 5, s. 953-964. ISSN 0043-7719. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00226-011-0456-5>. [cit. 2024-01-11].
- [58] XU, Bo-Han; WANG, Bi-Lin; YU, Kong-Bin a BOUCHAÏR, Abdelhamid. An optional connection material in timber structures: densified poplar. online. *Journal of Materials Science*. 2021, roč. 56, č. 25, s. 14114-14125. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06194-5>. [cit. 2024-01-11].
- [59] SEKINO, Noboru; INOUE, Masafumi; IRLE, Mark a ADCOCK, Tim. The Mechanisms Behind the Improved Dimensional Stability of Particleboards Made from Steam-Pretreated Particles. online. *Holzforschung*. 1999, roč. 53, č. 4, s. 435-440. ISSN 0018-3830. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/HF.1999.072>. [cit. 2024-01-11].

- [60] AYDIN, Ismail a COLAKOGLU, Gursel. Variations in Bending Strength and Modulus of Elasticity of Spruce and Alder Plywood after Steaming and High Temperature Drying. online. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2008, roč. 15, č. 5, s. 371-374. ISSN 1537-6494. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/15376490801977692>. [cit. 2024-01-11].
- [61] MCGAVIN, Robert; NGUYEN, Hoan; GILBERT, Benoit; DAKIN, Tony a FAIRCLOTH, Adam. A comparative study on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) produced from blending various wood veneers. online. *BioResources*. 2019, roč. 14, č. 4, s. 9064-9081. ISSN 19302126. Dostupné z: <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.9064-9081>. [cit. 2024-01-10].

Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Schéma technologie tepelné modifikace Firmolin (1 – topný plášť autoklávu, 2 – tepelná izolace, 3 – ventilátor, 4 – dřevěný materiál, 5 – topné těleso, 6 – zásobník vody, 7 – vodní pára) [3]	15
Obr. 2: SEM snímek z pozorování spojovací linie v olšové překližce nezhuštěné (C) a zhuštěné dýhy (V – céva, F – dřevní vlákno, červená čára značí spojovací čára, bílá šipka znázorňuje prasklinu, močovinoformaldehydová pryskyřice je zaznačena zelenou šipkou. Měřítko snímku: 20 μ m) [27].....	21
Obr. 3: Porušení dřeva ve vzorcích po zkoušce pevnosti ve smyku: (a) panely s vyšším obsahem lepidla; (b) panely s nižším obsahem lepidla [22].....	23
Obr. 4: SEM snímky lepené linky s lepidlem MUF [1].....	25
Obr. 5: Ukázka densifikace březových překližek v nerezovém sítu se speciálním úpletem pro zajištění odvodu páry pro potlačení delaminace (LDF MENDELU Brno)	34
Obr. 6: Ukázka densifikované překližky (a) a následný způsob lepení systémem PRF 1711/2520 (b).....	37
Obr. 7: Schéma úpravy vzorků – zářezy pro lepený (modrá linie na levém obrázku) kompozitní materiál (hodnoty uvedeny v mm)	38
Obr. 8: Nákres zkušebních vzorků na referenčním lepeném kompozitním systému překližovaná deska/překližovaná deska.....	38
Obr. 9: Referenční zkušební vzorek upnutý mezi drážkovými čelistmi tahového zkušebního lisu M350-20 CT	39
Obr. 10: Ukázka porušení vzorků (lepidlo PRF) po namáhání v místě smykové plochy, horní referenční vzorek se 30% kohezním porušením, spodní densifikovaný vzorek se 100% kohezním porušením v dřevní části vzorku.....	40
Obr. 11: Ukázka porušení vzorků (lepidlo PUR) po namáhání v místě smykové plochy, horní ref. vzorek s 80% kohezním porušením, spodní densifikovaný vzorek se 100% kohezním porušením v dřevní části vzorku.....	40
Obr. 12: Uložení vzorků smrkové překližované desky v prostředí 90 %/30 °C.....	44
Obr. 13: Zkouška pevnosti v ohybu, působení 4–bodového namáhání	45

Seznam použitých tabulek

Tab. 1: Souhrn technických parametrů použitého hydraulického lisu HL 400 [15].....	33
Tab. 2: Vlastnosti překližovaného materiálu dle výrobce.....	35
Tab. 3: Technické údaje fenol-resorcín-formaldehydového systému 1711/2520 [46].....	35
Tab. 4: Technické údaje polyuretanového lepidla 2010 [48].....	36
Tab. 5: Srovnání skutečného stavu lepení pro obě adhesiva.....	37
Tab. 6: Jednotlivé skupiny úprav [15]	41
Tab. 7: Rozpustnost různých látek při daných teplotách – výňatek z normy [51].....	42
Tab. 8: Vlastnosti překližovaného materiálu dle výrobce.....	43
Tab. 9: Kompresní poměr pro jednotlivé varianty	46
Tab. 10: Průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení kompozitních systémů po expozici I	47
Tab. 11: Průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení kompozitních systémů po expozici II.....	48
Tab. 12: Průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení kompozitních systémů po expozici III.....	48
Tab. 13: Průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení kompozitních systémů po expozici IV	49
Tab. 14: Procentuální porušení vyvíjených kompozitů v dřevěném adherendu, resp. v lepeném spoji vycházející z celého souboru vzorků pro jednotlivý typ lepidla.....	50
Tab. 15: Průměrné hodnoty tloušťek vzorků jednotlivých densifikovaných úprav po vystavení danému prostředí pro prvních 10 měsíců měření	51
Tab. 16: Průměrné hodnoty tloušťek vzorků jednotlivých densifikovaných úprav po vystavení danému prostředí pro zbývajících 8 měsíců měření.....	51
Tab. 17: Výsledná hodnota parametru set-recovery	52
Tab. 18: Průměrné hodnoty pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu smrkové překližované desky	52

Seznam použitých grafů

Graf 1: Objemová změna vzorků dřeva tepelně upraveného vzduchem (a) a tepelně upraveným tungovým olejem (b) [21].....	18
Graf 2: Pevnost ve smyku bukového dřeva lepeného PRF v závislosti na teplotě [37].....	26
Graf 3: Pevnost ve smyku bukového lepeného dřeva polyuretanovým lepidlem, výrazný pokles při 220 °C [37]	27
Graf 4: Grafické znázornění pevnosti ve smyku březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, druhu lepidla a směru zkoušení po 1. expozici.....	53
Graf 5: Grafické znázornění kohezního porušení březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, lepidla a směru zkoušení po 1. expozici	54
Graf 6: Grafické znázornění pevnosti ve smyku březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, druhu lepidla a směru zkoušení po 2. expozici.....	55
Graf 7: Grafické znázornění kohezního porušení březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, lepidla a směru zkoušení po 2. expozici	55
Graf 8: Grafické znázornění pevnosti ve smyku březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, druhu lepidla a směru zkoušení po 3. expozici.....	56
Graf 9: Grafické znázornění kohezního porušení březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, lepidla a směru zkoušení po 3. expozici	57
Graf 10: Grafické znázornění pevnosti ve smyku březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, druhu lepidla a směru zkoušení po 4. expozici	57
Graf 11: Grafické znázornění kohezního porušení březové překližované desky v závislosti na typu úpravy, lepidla a směru zkoušení po 4. expozici	58
Graf 12: Grafické srovnání kohezního porušení systému březová překližka/lepidlo pro epoxidové, PUR a PRF lepidlo v závislosti na dané expozici a tepelné úpravě ve směru podél vláken	59
Graf 13: Grafické srovnání kohezního porušení systému březová překližka/lepidlo pro epoxidové, PUR a PRF lepidlo v závislosti na dané expozici a tepelné úpravě ve směru napříč vláken.....	60
Graf 14: Grafické znázornění procentuálního porušení zkušebních vzorku v případě PRF, PUR a epoxidového lepidla (Biresin CR 82) použitých pro lepený spoj	61

Graf 15: Grafické znázornění parametru set-recovery pro obě typy densifikačních úprav lišících se stabilizací výsledného stavu pro 3 prostředí.....	62
Graf 16: Grafické znázornění průměrné změny tloušťky v závislosti na druhu úpravy	64
Graf 17: Grafické znázornění pevnosti v ohybu smrkové překližované desky v závislosti na variantě termické úpravy	65
Graf 18: Grafické znázornění modulu pružnosti v ohybu smrkové překližované desky v závislosti na variantě termické úpravy	66